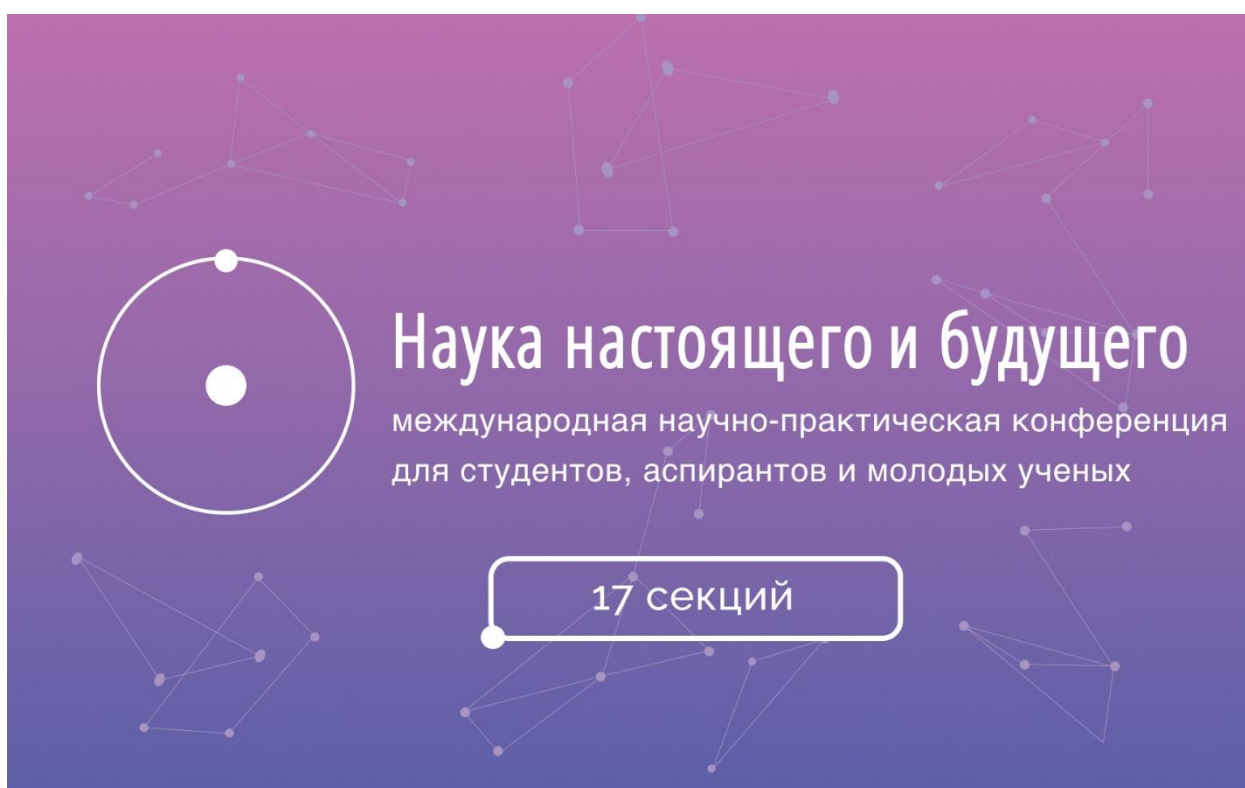


Министерство образования и науки РФ  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**XII НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**



**Сборник материалов конференции  
16 – 18 мая 2024**

**Том II**

Санкт-Петербург  
2024

УДК 001.2

**ХII НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С  
МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И  
БУДУЩЕГО» ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ  
УЧЕНЫХ. Том 2. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. 359 с.**

**Организаторы:**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, АО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ «ВЕКТОР», ООО «Ультразвуковая техника - ИНЛАБ», дочерние общества и организации ПАО «Газпром».

**Тематика конференции включает следующие направления**

- *Информационные радиотехнические системы и устройства*
- *Информатика и управление в технических системах и ВТ*
- *Программная инженерия и автономные интеллектуальные системы*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Алгоритмическая математика*
- *Мехатроника и робототехника*
- *Приборостроение*
- *Лингвистика*
- *Электроника, нанотехнологии, наноматериалы*
- *Системный анализ и информационная безопасность*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Электропривод, автоматика и электротехнологии*
- *Биотехнические системы и технологии*
- *Техносферная безопасность*
- *Реклама и связи с общественностью*
- *Технологическое предпринимательство: от проектного замысла к рыночному позиционированию*
- *Современные тренды управления и цифровая экономика*
- *Инновационное проектирование: от реальных объектов к цифровым двойникам*

Сборник материалов содержит доклады, представленные на ХII Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, состоявшейся 16 – 18 мая 2024 года в Санкт-Петербурге. Основной задачей конференции является развитие творческой активности студентов, привлечение их к решению актуальных задач в области науки и техники. Все доклады проходят рецензирование.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>11</b>
Ануфриев И.Е. СИСТЕМА СИНТЕЗА МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ .....	11
Ахмеров Д. М. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ.....	13
Баймухаметова Р. М., Максимов А. И., Никонова В. А. СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА .....	15
Баранова М.А., Осипков А.С., Моисеев К.М., Деримедведь Д.К. АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА .....	18
Басов Б.А., Макарова К.Т., Моисеев К. М., Осипков А.С. МЕТОД ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПВДФ ПЛЕНОК.....	22
Бобков А.А., Козодаев Д.А., Мошников В.А. СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ В СПБГЭТУ «ЛЭТИ».....	26
Богданова М.В. МИКРОФЛЮИДНЫЙ ЧИП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФфуЗИИ НАНОЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИИ .....	29
Бриллиантов В.Д. МИКРОКАНАЛЬНАЯ ПЛАСТИНА С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭОП .....	32
Бронников П.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОМПОЗИТА ZNO-CUO В ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО КРАСИТЕЛЯ.....	37
Бузовкин С.С. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРОЙНЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА.....	41
Буй К. Д. ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ G-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> С ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ В ГАЗОВЫХ СЕНСОРАХ ..	42
Бухбиндер Н.В., Семенов А.С., Семёнов М.Д., Кривошеева А.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ .....	45
Висицкий Д.В, Ремеле В.Е., Кузьмин М.В. ВЛИЯНИЕ ВАЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА 2+ → 3+ В НАНОПЛЕНКАХ ИТТЕРБИЯ НА ДЛИНУ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ .....	48
Гаврус И.В., Степченко А.Д., Яковенко А.А. ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ НА 150 ММ КРЕМНИЕВЫХ ДИСКАХ.....	52

Гагарина А.Ю., Шумило М.В., Безверхний В.П. ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ И ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ИК ФУРЬЕ- СПЕКТРОСКОПИИ.....	56
Грибовская О.С., Елефтериادي Э.А., Васильева А.В. КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАСЛЯНЫХ КРАСОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА И СПЕКТРОСКОПИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ.....	58
Н. А. Гриценко, Т. Д. Аракелян, А.Р.Ванцев МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХОДЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ.....	62
Джураева Е.Н., Новиков И.А. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА.....	66
Доморацкий Е.В., Захарченко М.В., Глинский Г.Ф. АНАЛИЗ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ.....	68
Еманов Д.П., Моисеев К.М., Осипков А.С. РАЗРАБОТКА СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ D <sub>33</sub> ПЛЕНОК ПВДФ МЕТОДОМ «ПАДАЮЩЕГО ШАРИКА».....	71
Емельянов И.Д. ИНТЕГРАЦИЯ ИСТОЧНИКА-ИЗМЕРИТЕЛЯ KEYSIGHT B2901A С ЗОНДОВОЙ СТАНЦИЕЙ В РАМКАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР.....	76
Заиченко А.Н., Степченко А.Д., Зиненко М.Б. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМОМИГРАЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ Ga КРЕМНИЕВЫХ КАНАЛОВ.....	80
Зорин И.А, Павлова М.Д., Хоршев Н.А., Ламкин И.А. ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РЗНТ:РСВМ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ.....	82
Зырянова О.Д., Налимова С.С. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДИСУЛЬФИДАТ ВОЛЬФРАМА .....	86
Исхакова Э.Р., Еманов Д.П., Моисеев К.М., Осипков А.С. РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ ПВДФ ПЛЕНОК МЕТОДОМ «ТРАНСФОРМАТОРА».....	88
Касапиди Г.А. СТЕНД В ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВАХ АКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.....	93
Косогорова Т.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ.....	96



ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 – 17(18) мая 2024

Кошкин С. М., Попов А. Г. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КМОП- МИКРОСХЕМЕ .....	100
Кузьмин П. А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР BUFFER TREE, H- TREE И CLOCK MESH ДЛЯ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ТАКТОВОГО СИГНАЛА.....	103
Мадисон П.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ПОРЯДКА В НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ .....	108
Малевская А.Д., Хвостикова О.А., Сорокина С.В. ЛАЗЕРНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ С ДИФфуЗИОННЫМ P-N-ПЕРЕХОДОМ.....	111
Мальков Д.А., Сорокина С.В., Кузьмин М.В. КИНЕТИКА СИЛИЦИДООБРАЗОВАНИЯ В ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ YB-Si(111) .....	116
Марценюк Е.Н., Ситков Н.О., Коляда Д.В., Рябко А.А. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ .....	120
Матвеев Д.А., Максимов А.И. СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZNO И Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА..	121
Матвиенко В.А, Тарасов А.С, Дегтерев А.Э, Ламкин И.А. СОЗДАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ ЗА СЧЕТ СОЧЕТАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ.....	126
Mbwahnche R.C. PECULIARITY OF THE FORMATION OF DROPLET IN THE FLOW REACTOR .....	129
Галякбаров Р.И., Мелконян Г.Э. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.....	133
Мирошкина В.В., Гукетлов А.М., Шомахов З.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА .....	137
Михайлис М., Овсянников Н.А. АНАЛИЗ СОСТАВА ЭФФЛЮЕНТА ПЕРИТОНЕАЛЬНОГО ДИАЛИЗАТА С ПОМОЩЬЮ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННОГО ХИМИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГЕЛЬ-ХРОМАТОГРАФИИ С УФ- ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ И ОПТИЧЕСКОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	139
Моняк А.А., Сорокина С.В., Кузьмин М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ Si(100) С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	139
Морозова Н.А. РАЗРАБОТКА СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА .....	147

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 – 17(18) мая 2024

Козодаев Д.А., Муратова Е. Н., Трусов М.А., Яковлева А.А. О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ В ОБЛАСТИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ.....	147
Мурзалинов Д.О., Жапаков Р.М., Кемелбекова А.Е., Бегунов М.А., Середавина Т.А., Чучвага Н.А. ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ZNO НА ПОВЕРХНОСТЬ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО МНОГОЭТАПНОГО ОТЖИГА ..	150
Нартов А.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КФЭУ С РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ	154
Никифоров А.И., Ануфриев И.Е., Мальков Д.А. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТОБОРАБОТКИ ЛИПОСОМ.....	159
Новиков И.А., Бобков А.А. НЕРЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ.....	162
Овезов М. К., Рябко А. А., Алешин А.Н. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ МАРVI <sub>3</sub> С ДОБАВЛЕНИЕМ МОНОЭТАНОЛАМИНА .....	167
Поляков Д.Д., Сухорученков К.В. МЕТОД ПРОФИЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИЛЬЯМСОНА-ХОЛЛА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВКЛАДОВ В УШИРЕНИЕ РЕФЛЕКСОВ .....	167
Потапов М.А., Адамович Д.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ПРИ ЕГО ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ...	174
Радайкин Д.Г., Джураева Е.Н. ПРАКТИЧЕСКИЕ СТОРОНЫ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ В ЭКОЛОГИИ И ФОТОКАТАЛИЗЕ.....	174
Ремеле В.Е., Кузьмин М.В. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РОСТА ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕТРОСКОПИИ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	181
Рыбина А.А. ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ СТАННАТА ЦИНКА, ДЕКОРИРОВАННОГО СЕРЕБРЯНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ.....	185
Рябко А.А. МАСШТАБИРУЕМАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ АДСОРБЦИОННЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ .....	187
Сайгушева А.В., Бурчик Н.Е. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ С ДЕТЕКТОРА WIDEPHX.....	189
Сатторов М.Ш. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛ ЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ .....	193

Смирнов И.А., Момяк А.А., Кузьмин М.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР O2-YB-SI(111) С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ .....	197
Смирнова С.П., Давыдов С.Н., Смердов Р.С., Истомина М.С., Кондратьев В.М. ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА НИЗКОВОЛЬТНЫХ КАТОДОВ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМ СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ... 201	201
Сухорученков К.В., Поляков Д.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ НАНОСТЕРЖНЕЙ ГИДРОКСИАПАТИТА МЕТОДОМ СОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА .....	205
Сысоев Е.И. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ ЯЧЕЙСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВДОХНОВЛЕННЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ .....	208
Телицын Н.С. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ КРАЕВОГО И ПРИМЕСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АЛМАЗА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ .....	212
Тимофеев А.А., Новиков Н.В. РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	215
Удовиченко В., Крохманский В., Рындин Е.А. ТОПОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННОГО СИНАПСА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ .....	220
Урмурзин Д. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВУДА И РОЗЕ В ПРЫЖКОВОЙ МОДЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ .....	223
Фельде А.А., Сидорова С.В. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГИБКИЙ ТЕРМОМЕТР.....	225
Фокина Н.А., Ненашев Г.В., Алешин А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАНДЕМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ, НАНЕСЕННЫХ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ .....	229
Халугарова К., Спивак Ю. М. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗЕЛЕННОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ И ОКСИДА НИКЕЛЯ.....	232
Халугарова К., Сатторов М. Ш., Спивак Ю. М. ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЗЕЛЕННОГО СИНТЕЗА .....	236
Хамитов К.А. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЗУЕМОЙ ТОПОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ СОЗУ .....	240

Чернышев Б.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ УДАЛЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО ИЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ И РІМ- ТЕХНОЛОГИЙ .....	244
Чуманов И.В., Фирсов Д.Д., Коляда Д.В., Комков О.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ GESISN/GE/SI ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ ФОТОМОДУЛЯЦИОННОЙ ИК ФУРЬЕСПЕКТРОСКОПИИ.....	247
Швиндин М.А., Бахметьев В.В., Зеленина Е.В. ВЛИЯНИЕ СВЧ ОБРАБОТКИ НА ЯРКОСТНО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЦИНКСУЛЬФИДНЫХ РАДИОЛЮМИНОФОРОВ.....	251
Шевченко С.А., Оселков Г.С., Иванов Б.В., Смирнов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА .....	255
Шевченко Ю.Т. УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ ОКСИД МЕДИ ДЛЯ КАТАЛИЗАТОРОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	259
Шубина М.А. ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР.....	264
Юферицын М.Д., Никонова В.А., Максимов А.И., Горляк А.Н., Альтмарк А.М., Лесив Н.А. ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ ZNO .....	264
<b>СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА .....</b>	<b>267</b>
Е.Д. Гухман, М.А. Косухина ПРИКЛАДНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДИКИ РАНЖИРОВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ФИНАНСИРОВАНИЯ ПРИЕМНОЙ КАМПАНИИ ВУЗА НА ПРИМЕРЕ СПБГЭТУ «ЛЭТИ» .....	267
Большакова А. ВЫБОР МОБИЛЬНОЙ ОС ДЛЯ ХУДОЖНИКА .....	271
Ю. Боровикова, Е. И. Екимова СТАНДАРТЫ ИСО ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	274
Гриневич Е.Д., Левина В.М. ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ БИЗНЕСОМ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ .....	277
В. В. Иконникова, Н. А. Руденко СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ В МЕНЕДЖМЕНТЕ .....	280
Н.А.Калинина, К.А. Бордошева ФАКТОРЫ ВЫБОРА РАБОТОДАТЕЛЯ НА ПРИМЕРЕ СТУДЕНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА .....	284

Касаткин Д.М. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНВЕСТИЦИЙ КАК ДВИЖУЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ.....	287
Тамбовцева В.В., Кравченко В.Д., Фомина И.Г. ТРЕНДЫ В ЛОГИСТИКЕ: ШАГ К УСТОЙЧИВОМУ БУДУЩЕМУ ЧЕРЕЗ ЗЕЛЕНУЮ ЛОГИСТИКУ .....	291
Бычков В.М., Осауленко Т.А., Кузьмин Н.П. ЗЕЛЁНАЯ ЛОГИСТИКА .....	294
Лысенкова А.М. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ЮРИДИЧЕСКИ ЗНАЧИМОГО ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В ВУЗАХ .....	295
С.А. Мордвинова ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ.....	298
Кручко А. М., Пиллогина В. А., Фомина И.Г. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ЛОГИСТИКЕ ИМПОРТА КОФЕ В РОССИИ .....	301
А.И. Прудникова И.А. Брусакова ВЫБОР ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СКЛАДСКОЙ ЛОСГИТИКИ.....	302
Рогачёв Н.А. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА.....	306
И.М. Романчак, М.И. Житенева РЫНОК РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА СКВОЗНЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....	309
М.Д. Смолина АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ФИНАНСИРОВАНИЯ ДЛЯ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА В СФЕРЕ ИСТ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ООО КЗ «СПУТНИК» .....	312
<b>СЕКЦИЯ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....</b>	<b>318</b>
Аксютин В.В., Ананьева А.Я., Заречная Ю.С. МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ В ВУЗЕ.....	318
Буравлев А.С., Дубенецкий В.А. К ВОПРОСУ О СКРЫТЫХ МАЙНЕРАХ И ИХ УГРОЗЕ СОВРЕМЕННОМУ ОБРАЗОВАНИЮ.....	322
Дзейн Д. Ю. АНАЛИЗ КОНВЕРСИИ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ: КАК УЛУЧШИТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВАШЕГО САЙТА .....	326
Кашликова М.А. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ИНТЕРФЕЙСА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	329
Колосов Е.Д., Ткачев А.С., Матвеев Д.А, Шпаковский. Н.Ф. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ – НЕОБХОДИМЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ .....	331

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 – 17(18) мая 2024

Кравчук Н.С., Гжималаускас А. Ю., Кирсанов А.М. АРХИТЕКТУРА И СТЕК ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗГОВОРНОЙ ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ PERPLEXITY AI .....	333
Латанов К.В., Благов М. В. СТЕГАНОГРАФИЯ В PNG-ФАЙЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КРИПТОГРАФИИ .....	337
Моисеев К.О., Трофимова А.О. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЛИНИЙ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА.....	340
Тарасевич О.А., Назаренко Н.А. БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО В МЕДИЦИНЕ .....	344
Чепасов Д.В., Щедрин А.А. ОТРАВЛЯЮЩИЕ АТАКИ НА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ.....	347
Шатов М.С., Мансуров В.А., Галкина Т.В. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВНИМАНИЯ У ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПОД УПРАВЛЕНИЕМ АВТОПИЛОТА.....	351
Ширяев Н.А. ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ .....	355

## СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

### СИСТЕМА СИНТЕЗА МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ

АНУФРИЕВ И.Е.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)», факультет электроники, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ «НМИЦ им В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Данная работа рассматривает возможности создания микрофлюидных чипов для различных химических синтезов, способных работать в условиях агрессивных сред. Для создания таких систем, вместо традиционного способа формирования микрорельефа на поверхности мастер-формы, предлагается лазерная микрообработка поверхности с последующей полировкой. Рассматривается использование химически стойких и оптически прозрачных модификаций фторопласта в качестве основного материала для создания чипов.

*Ключевые слова:* микрофлюидный чип, синтез липосом, фторопласт, лазерная микрообработка.

Микрофлюидика — это наука, описывающая поведение жидкостей микро- и нанообъемов в потоках, где основными взаимодействиями являются ламинарное течение и диффузия. Использование микрофлюидных устройств может заменить практически все методы химического синтеза, в них можно более точно контролировать реакционные процессы [1]. Устройства позволяют ускорить аналитические процессы и проводить исследования *in situ*. С помощью микрофлюидных чипов можно реализовать новые методы синтеза, что всегда интересно для науки. В России микрофлюидика развита плохо и мало где используется.

В начале развития микрофлюидики основными материалами для производства чипов были кремний и стекло, на которых с помощью литографии создавались микрорельефы. Однако, поскольку эта технология очень дорога, в настоящее время производство перешло на мягкую литографию, где основным материалом являются полимеры. Использование более дешевых материалов и технологий в этом методе значительно удешевило производство. Однако, к сожалению, используемые в настоящее время материалы разрушаются в агрессивных средах, например, в полярных растворителях, таких как спирт, хлороформ и ацетон. По этой причине проведение многих химических синтезов становится невозможным.

Целью данного исследования является создание микрофлюидного синтеза, способного работать в условиях, в которых обычные микрофлюидные чипы обычно не могут работать. Также необходимо попытаться создать относительно дешевый и масштабируемый метод производства, поскольку в настоящее время это считается дорогостоящим мероприятием.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Выбрать материалы, способные противостоять агрессивным средам.
2. Разработать ряд топологий чипов, позволяющих осуществлять различные методы микрофлюидного химического синтеза.
3. Разработать методы создания мастер-формы и самих чипов. (Отметим, что на данном этапе также рассматривался вариант создания мастер-формы альтернативными

методами, например, с помощью лазерной микрофабрикации, а не литографии, поскольку задача состояла в том, чтобы изготовить ее недорого).

Мы разработали пять различных топологий чипов, пригодных для синтеза липосомальных лекарств. Липосомальные лекарства применяются в клинике для лечения онкологий, изготовления БАДов, терапии инфаркта миокарда [2] и других заболеваний [3]. Основной принцип синтеза заключается в микрофокусировке раствора липидов и потока воды, на границе которых формируются липосомы определенного размера, инкапсулирующие активное вещество. Размер получаемых частиц зависит от топологии. Помимо микрофокусировки, были смоделированы две системы, в которых происходит интенсивное перемешивание веществ, приводящее к образованию липосом. Этот метод позволяет получить везикулы меньшего размера, чем другие методы, и исключает необходимость дальнейшей гомогенизации раствора липосом. Помимо синтеза липосом, некоторые из представленных топологий могут также подойти для синтеза PLGA и магнитных наночастиц.

Основное отличие от нашей работы заключается в материале чипов. Мы используем фторэтилен-пропилен и фторопласт-50, которые обладают очень высокой химической стойкостью и в то же время всеми преимуществами материалов типа PDMS [4]. Фторопласты уникальны по своим свойствам. Они огнестойки, пластичны, невоспламеняемы, термостойки, морозостойки, обладают отличными диэлектрическими свойствами и сохраняют эластичность в широком диапазоне температур. По химической стойкости фторполимеры превосходят все известные полимеры и драгоценные металлы (золото и платину). В то же время фторполимеры оптически прозрачны, что позволяет оценивать процесс синтеза в режиме реального времени. Так как ставится задача низкой стоимости, используются методы мягкой литографии, но для изготовления чипов из тефлона на требуется температура спекания около 300°C, что необходимо учитывать при разработке системы изготовления чипов.

Был разработан метод синтеза микрофлюидных чипов с использованием метода нанопринтинга. Сначала полимеры, из которых состоит чип, необходимо поместить в контейнер. Используя фторполимер FPA или FEP, гранулы укладываются на дно, помещаются между мастер-шаблоном и формой, и полимер спекается при температуре и давлении около 300°C для повторения рельефа мастер шаблона. Таким же образом для получения закрывающего слоя используется только плоская поверхность. Наконец, два слоя необходимо спечь вместе в одной емкости. Такая система может быть использована для изготовления микрофлюидных чипов более сложной конструкции, состоящих как минимум из трех слоев. Для изготовления такой системы в качестве материала был выбран сплав нержавеющей стали 30X13, который был нарезан на диски, а затем доведен до требуемой формы с помощью электроэрозии и механической полировки. Такой процесс обработки позволяет добиться максимальной точности, необходимой для изготовления однородных листов микрофлюидных чипов.

Основные мастер-формы, используемые в мягкой литографии, изготавливаются методом фотолитографии, но для разработки чипов с новыми топологиями требуется дорогостоящее оборудование и квалифицированный персонал. Чтобы упростить производство мастер-форм, вместо фотолитографии можно использовать лазерную обработку и полировку поверхности [5]. Для получения требуемой структуры на поверхности нержавеющей стали была использована лазерная система микрообработки МикроСЕТ РА компании «Лазерный центр». Ее устройство позволяет создавать



структуры с минимальным разрешением 3 мкм, чего вполне хватает для поставленных задач. При желании, полученную мастер форму можно отполировать методом электролитно-плазменной полировки [6], что еще больше улучшит качество рисунка на поверхности.

### Список литературы

1. Основы нанотехнологий. Часть 1: учебное пособие / К. И. Белоусов, А. А. Евстапов, И. В. Кухтевич, Я. С. Посмитная. – Санкт-Петербург: ИТМО, 2015. – 55 с.
2. Dmitry Sonin, Garry Papayan, Maria Istomina, Ilya Anufriev, Evgeniia Pochkaeva, Sarkis Minasian, Ekaterina Zaytseva, Daria Mukhametdinova, Daniil Mochalov, Piia Aleksandrov, Nickolay Petrishchev, and Michael Galagudza, "Advanced technique of myocardial no-reflow quantification using indocyanine green," Biomed. Opt. Express 15, 818-833 (2024)
3. ИССЛЕДОВАНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОПОРИСТЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЛЕКАРСТВ В МЕДИЦИНЕ Шевченко В.Я., Киселев О.И., Соколов В.Н., Агафонов А.В., Алешина Н.А., Антропова Т.В., Анциферова Ю.С., Баранчиков А.Е., Бурылев В.В., Васин А.В., Гордеев С.К., Долинина Е.С., Егоров В.В., Иванов В.К., Копица Г.П., Красильникова А.К., Кручинина И.Ю., Ксенофонтова О.И., Леньшин А.С., Мошников В.А. и др. Санкт-Петербург, 2015.
4. Ren, K. N., Wu H., Zhou J. Whole-Teflon microfluidic chips // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2011. – Vol 108, №20. – P. 8162–8166.
5. Альтернативные подходы при создании мастер-форм для изготовления чипов методом “мягкой” литографии / Я. С. Посмитная, А. С. Букатин, Д. А. Макаров [и др.] // Научное приборостроение. – 2018. – Т. 27, №2. – С. 13–20.
6. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 232 с.

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

АХМЕРОВ Д. М.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Проанализированы критерии эффективности конструкций резонансных микромеханических акселерометров с частотным выходом с учетом чувствительности и частотного диапазона работы. Определен комплексный критерий, который позволяет оценить эффективность конструкций микромеханических резонансных акселерометров.

*Ключевые слова:* МЕМС, акселерометр, резонансный акселерометр

### Введение

На сегодняшний день микромеханические акселерометры с аналоговым выходом занимают значительный объем в экономике микро электромеханических систем (МЕМС), так как данные акселерометры используются во многих областях производства, к которым относятся электроника, автомобилестроение, самолетостроение и др. Однако к приборам, применяющимся в атомной и космической промышленности, стоят повышенные требования, которые могут обеспечить микромеханические акселерометры с частотным выходом.

Их принцип работы состоит в том, что при деформации чувствительного элемента изменяется собственная частота выходного сигнала. Таким образом по ее изменению можно оценить величину входного воздействия. Несмотря на сложность технологии изготовления

и необходимость учета влияния температуры и нелинейности преобразования в широком диапазоне, у данного вида акселерометров имеются следующие важные преимущества:

- высокая чувствительность;
- малая потребляемая энергия;
- малый дрейф выходных характеристик при воздействии внешних помех,
- частотный сигнал сразу преобразуется в цифровой без использования прецизионных аналоговых схем, что существенно упрощает схему обработки и повышает стабильность измерительной системы.

Таким образом целью данной работы стал анализ возможных конструктивных решений и критериев их оценки для разработки и оптимизации конструкций микромеханических акселерометров с частотным выходом.

### **Критерии для анализа конструктивных решений резонансных акселерометров**

Для анализа эффективности конструкций микромеханического резонансного акселерометра можно выделить несколько принципиальных конструктивных решений [1 – 2]:

1. Струнный, с изменяемым натяжением струны от инерционной массы.
2. С нелинейной жесткостью упругого подвеса инерционной массы.
3. С электростатической нелинейной упругостью подвижного электрода.
4. Акселерометр типа "математический маятник".

Все выделенные конструкции представляют собой резонатор в микромеханическом исполнении, у которого эффективная жесткость  $k$  изменяется при смещении инерционной массы под действием линейного ускорения. Герметизация и вакуумирование конструкции обеспечивает условия для выделения частоты собственных колебаний. Изменение резонансной частоты от ускорения определяет чувствительность преобразователя.

Для оценки эффективности конструкций важно учитывать добротность механического резонатора. Она описывает возможность детектирования пика выходного сигнала на резонансной частоте. Добротность зависит от резонансной частоты ( $f_0$ ) по формуле  $Q = f_0/\Delta f_{\text{пв}}$ , где  $\Delta f_{\text{пв}}$  – ширина полосы пропускания на полувысоте.

В микромеханическом акселерометре с частотным выходом при изменении измеряемой величины, ускорения ( $\Delta a$ ), изменяется и резонансная частота на величину равную  $\Delta f$ . Для учета пороговой чувствительности при оценке конструкций можно сформировать следующий критерий:

$$Q \cdot (\Delta f/f_0) \rightarrow 1$$

Полученная формула позволяет сделать вывод, что стоит уменьшать резонансной частоту при моделировании чувствительного элемента, однако ее нельзя выбрать меньше частоты изменения входного воздействия.

Фактически, относительное изменение резонансной частоты можно заменить на глубину модуляции жесткости. А в номинальном диапазоне измерений полученное соотношение может служить критерием для повышения точности и чувствительности частотных акселерометров:

$$Q \cdot (\Delta k/k)$$

При анализе различных конструкций акселерометров было показано, что величина глубины модуляции жесткости пропорциональна изменению ускорения и обратно пропорциональна квадрату резонансной частоты ( $\Delta k/k \sim \Delta a \cdot f_0^{-2}$ ). Таким образом, с

учетом частотного диапазона измерений, комплексный критерий оценки эффективности конструкции микромеханического резонансного акселерометра:

$$Q \cdot (\Delta k / k \Delta a) \cdot f_0^2 = coef$$

В правой части выражения выше параметр *coef* включает в себя значения размеров конструкции и физические параметры микромеханического акселерометра с частотным выходом.

### **Заключение**

В результате анализа был сформулирован комплексный критерий оценки, который позволяет оценивать конструкции микромеханических резонансных акселерометров. В данном критерии добротность отвечает за способность детектирования сигналов при изменении входного воздействия, глубина модуляции жесткости отвечает за чувствительность конструкции к входному воздействию, а квадрат резонансной частоты отвечает за частотный диапазон измерения входного воздействия. Таким образом для одной и той же конструкции (параметры в правой части критерия оценки) можно количественно оценивать параметры левой части и изменять их под необходимые требования микромеханического резонансного акселерометра.

### **Список литературы**

1. Bahreyni, B. Fabrication and Design of Resonant Microdevices. Fabrication and Design of Resonant Microdevices.
2. Калёнов В. Е., Корляков А. В. Создание автоколебательного режима работы в микромеханических системах на основе емкостного преобразователя.

## **СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА**

БАЙМУХАМЕТОВА Р. М., МАКСИМОВ А. И., НИКОНОВА В. А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376,  
Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В работе представлены результаты получения и применения наночастиц серебра методом химического восстановления в водном растворе аскорбиновой кислоты. Исследования синтезированных наночастиц проводились с помощью методов спектрофотометрии, динамического рассеяния света и атомно-силовой микроскопии. Выявлены оптимальные условия для получения стабильных наночастиц средних размеров и высокой дисперсией.

*Ключевые слова:* наночастицы серебра, химическое восстановление, коллоидные растворы

В настоящее время наночастицы серебра являются важным объектом современных исследований благодаря уникальным физическим и химическим свойствам, связанным со значительной величиной отношения площади их поверхности к объему, и другим размерным эффектам. Наночастицы серебра обладают сильным антимикробным действием, благодаря чему активно применяются для разработки бактерицидных покрытий и пленок. Чернила на основе наночастиц серебра могут использоваться для создания проводящих элементов на различных поверхностях, таких как печатные платы, сенсоры или электронные устройства. Наночастицы серебра могут быть использованы в качестве чувствительных элементов для датчиков, реагирующих на изменения окружающей среды, таких как температура, влажность, pH и другие параметры. Благодаря плазмонным эффектам металлические наночастицы используются для усиления

поверхностно-плазмонного резонанса (SPR) и поверхностно-усилительного рассеяния (SERS).

В данной работе синтезированы наночастицы серебра методом химического восстановления аскорбиновой кислоты в водном растворе [1]. Данный метод позволяет получать довольно устойчивые коллоидные растворы, содержащие наночастицы сферической формы [2]. Изменение условий проведения синтеза и концентраций исходных реагентов приводит к изменению размеров получаемых частиц, интенсивности светопоглощения, смещению резонансной полосы. Аскорбиновая кислота в данном методе выступает в роли восстановителя, цитрат натрия - в качестве стабилизатора поверхности наночастиц, и хлорид натрия – для придания частицам квазисферической формы. К раствору аскорбиновой кислоты с концентрацией  $0,9 \cdot 10^{-4}$ – $7,4 \cdot 10^{-4}$  моль/л добавляли нитрат серебра, цитрат натрия и хлорид натрия, затем нагревали на магнитной мешалке при температуре  $85^{\circ}\text{C}$ – $105^{\circ}\text{C}$  в течении 30 минут при постоянном перемешивании. После синтеза полученные растворы исследовались методами спектрофотометрии, динамического рассеяния света (ДРС) и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Целью исследования является оптимизация метода и возможность получения наночастиц серебра с определенными физическими свойствами, дисперсией, концентрацией, размером, стабильностью и т.д. Все это достигается за счет изменения технологических параметров процесса синтеза.

Анализ спектров поглощения показал наличие ярко выраженной полосы поглощения в видимой области спектра с максимумами спектральной характеристики, лежащими в диапазоне длин волн 414–454 нм. Данная полоса называется полосой поверхностного плазмонного резонанса [3] и указывает на факт получения наночастиц серебра, а также позволяет оценить средний диаметр полученных частиц. Средние размеры наночастиц рассчитанные на основе полученных спектров согласуются с данными ДРС и лежат в диапазоне 5–105 нм. Результаты АСМ также указывают на наличие наночастиц различных размеров в разных образцах. Таким образом, возможно получение наночастиц средних размеров 10–20 нм с малой дисперсией размера частиц за счет меньшей температуры нагрева  $85^{\circ}\text{C}$ – $90^{\circ}\text{C}$ . При увеличении температуры нагрева средний размер частиц сильно увеличивается вследствие образования агрегатов. Наиболее стабильные наночастицы были получены при концентрации аскорбиновой кислоты  $1,8 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Повышение концентрации восстановителя приводит к увеличению средних размеров наночастиц. Также ухудшается стабильность наночастиц – происходит агрегация с течением времени, как следствие уменьшается площадь активной поверхности наночастиц и снижается дисперсность. Также ухудшение стабильности наблюдалось при температуре проведения синтеза выше  $100^{\circ}\text{C}$ .

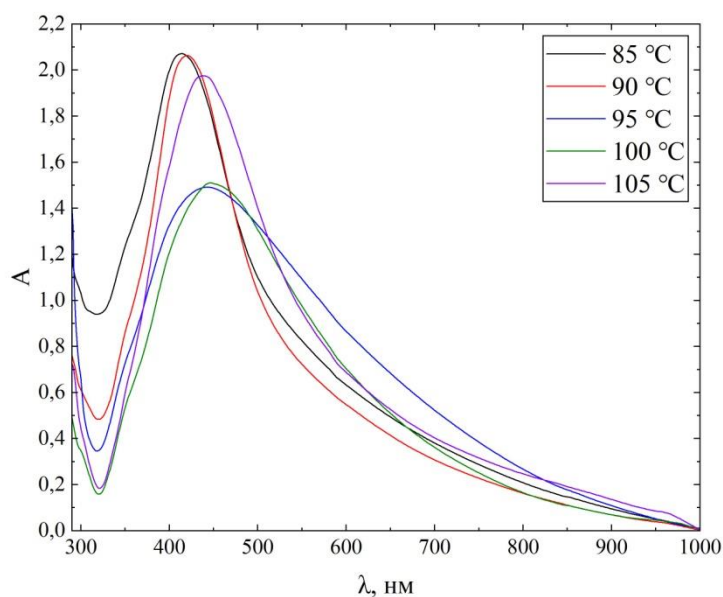


Рис. 1. Спектры поглощения для растворов, приготовленных при разной температуре нагрева магнитной мешалки

Как видно из рисунка 1, наиболее узкие спектры соответствуют растворам приготовленным при температуре магнитной мешалки 85°C и 90°C, средний размер полученных наночастиц составляет 10–15 нм. При температурах 95°C–105°C средний размер наночастиц лежит в диапазоне 50–65 нм.

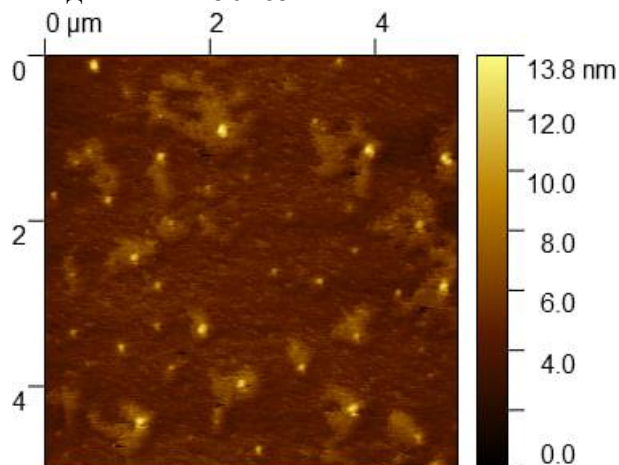


Рис. 2. Данные АСМ для наночастиц серебра, осажденных на кремниевую подложку

Данные АСМ на рисунке 2 соответствуют раствору приготовленному при температуре магнитной мешалки 85°C с концентрацией аскорбиновой кислоты  $1,8 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Размер наночастиц составляет ~10 нм, что согласуется с результатами ДРС и спектрофотометрии.

Работа выполнена в центре сканирующей зондовой микроскопии на оборудовании группы компаний ООО “НТ – МДТ” NTEGRA PRIMA.

### Список литературы

1. Матюшкин Л. Б. Технология и оборудование для получения коллоидных квантовых точек CsPbX<sub>3</sub> (X = Cl, Br, I), CdSe/ZnS, плазмонных наночастиц Ag/SiO<sub>2</sub> и гибридных структур на их основе: дис. ... канд. техн. Наук - Санкт-Петербург, 2018 - С. 87-90
2. Е.А. Вишнякова, С.В. Сайкова Определение условий образования наночастиц серебра при восстановлении глюкозой в водных растворах // Журнал Сибирского федерального университета. Химия - 2009 - С. 48-55
3. Тепанов А. А. Адсорбционная иммобилизация наночастиц серебра: закономерности и применение в химическом анализе: дис. ... канд. хим. наук - Москва, 2015 - С. 13-18

## АНТИОБЛЕДЕНТЕЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛИДЕНФТОРИДА

БАРАНОВА М.А.<sup>1</sup>, ОСИПКОВ А.С.<sup>1</sup>, МОИСЕЕВ К.М.<sup>1</sup>, ДЕРИМЕДВЕДЬ Д.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Аннотация.** Антиобледенительные покрытия вызывают большой интерес в последние два десятилетия благодаря развитию наноматериалов, а также более глубокому пониманию процессов образования зародышей льда и адгезии ко льду. В работе проведен обзор существующих антиобледенительных покрытий для аэрокосмического применения и требований, предъявляемых к ним. Кроме того, предложен новый тип антиобледенительного покрытия, основанный на пьезоэлектрических свойствах поливинилиденфторида (ПВДФ), рассмотрены его преимущества.

*Ключевые слова:* поливинилиденфторид, ПВДФ, антиобледенительное покрытие, ледофобная поверхность, супергидрофобная поверхность

### Введение

Наледь на самолетах оказывает негативное влияние как на безопасность, так и на летнотехнические характеристики. Многочисленные экспериментальные результаты показывают, что даже совсем небольшие наросты льда в критических местах могут значительно снизить максимальную грузоподъемность и эффективность рулевой поверхности, вызвать аномалии в управлении, увеличить лобовое сопротивление и снизить производительность двигателей и устойчивость самолета.

Существуют два основных типа методов борьбы с накоплением льда: активные и пассивные. Активные методы включают в себя применение химических, термоэлектрических или механических средств для удаления уже накопившегося льда. Они широко используются, но требуют значительных энергетических затрат, оказывают серьезное воздействие на окружающую среду и обладают высокой стоимостью как в производстве, так и в эксплуатации. Пассивные методы, напротив, ориентированы на предотвращение накопления льда или облегчение его удаления за счёт минимизации адгезионной прочности путем применения специальных противообледенительных покрытий. Эти методы обычно более экономичны, поскольку не требуют внешнего энергоснабжения для своей работы, и экологически безопасны.

Обледенение в атмосфере обычно происходит при контакте поверхности с переохлажденной водой в среде с низкой температурой (до -20°C). Первый этап этого процесса – смачивание поверхности переохлажденной водой – играет решающую роль в определении вероятности образования льда. Таким образом, супергидрофобные покрытия являются идеальными потенциальными противообледенительными материалами за счет повышенных барьеров свободной энергии для образования наледи и низкой адгезионной прочности.

Исследование [1] показывает, что пористое полимерное покрытие – универсальный подход к созданию супергидрофобной поверхности. Фторированные полимеры с низкой поверхностной энергией в особенности гидрофобны, химически и экологически стабильны, поэтому они являются наиболее часто используемыми материалами для создания супергидрофобной поверхности.

Однако использование только супергидрофобных покрытий без применения активных методов может оказаться недостаточным для защиты самолетов от обледенения. Это связано с тем, что микротекстурированные поверхности отталкивают только капли среднего размера, в то время как конденсированные микрокапли могут привести к образованию слоя инея, и сделать поверхность гидрофильной [2]. Решением данной проблемы может стать интеграция покрытий, обладающих пьезоэлектрическими свойствами.

В последнее время большое внимание уделяется поливинилиденфториду (ПВДФ) как материалу с особо низкой поверхностной энергией. ПВДФ, обладающий гибкостью и термостабильностью, представляет собой полукристаллический полимер, включающий аморфную и кристаллическую фазы. Кроме того, ПВДФ является перспективным материалом для применения в мембранах благодаря своим уникальным свойствам, таким как хорошая обрабатываемость, отличные механические и пьезоэлектрические свойства, исключительная химическая стабильность. Всё это определяет высокий потенциал применения мембран на основе ПВДФ в качестве покрытий конструкционных материалов.

Разработка ледофобных поверхностей начата в конце 1950-х годов. Но несмотря на значительный прогресс, достигнутый в последние годы, до сих пор не существует одновременно надежного, коммерчески жизнеспособного и долговечного антиобледенительного покрытия для аэрокосмических применений из-за сложностей, связанных с условиями обледенения и взаимодействием льда с поверхностями.

Целью данной работы является обобщение исследований в области антиобледенительных покрытий, сравнение их характеристик и анализ нового вида покрытия, обладающего пьезоэлектрическими свойствами.

### **Общая классификация покрытий и характеристики**

Для обеспечения ледофобности поверхности антиобледенительные покрытия должны обладать способностью отталкивать капли воды, задерживать образование зародышей льда, а после образования льда на поверхности снижать адгезионную прочность со льдом. Все три характеристики могут быть реализованы путем выбора материала покрытия; изменения молекулярной структуры материала; изменения морфологии / топологии поверхности и добавления смазочных средств или средств на основе антифриза; изменения физических свойств поверхности.

В таблице 1 представлены виды антиобледенительных покрытий, реализованные всеми вышеперечисленными методами и оцененные по следующим параметрам: угол контакта с водой (CA), поверхностная энергия материала (G), модуль Юнга материала (E), коэффициент снижения адгезии (ARF).

Поверхность классифицируется как супергидрофобная, когда угол контакта с водой на этой поверхности составляет  $> 150^\circ$ . Прочность сцепления со льдом на атомномолекулярном уровне характеризуется поверхностной энергией материала. Адгезия ко льду качественно описывается коэффициентом снижения адгезии. ARF

представляет собой отношение адгезионной прочности поверхности с эталонной поверхностью (обычно алюминиевой) к адгезионной прочности поверхности с антиобледенительным покрытием. Напряжение растяжения приводит к образованию трещин во льду, в то время как напряжение сдвига приводит к расслоению. Сцепление и возникновение напряжений на границе раздела лед-подложка или в поверхностном слое льда зависят от модуля Юнга материала. Чтобы в полной мере воспользоваться ледофобностью покрытия в сочетании с электромеханической противообледенительной системой, рекомендуется использовать покрытие с модулем Юнга  $> 1$  ГПа [3].

Таблица 1

**Характеристики покрытий, полученных разными методами**

Виды покрытий	Метод нанесения	CA, °	ARF	E, ГПа	G	Ссылка
Вязкоупругое покрытие на основе полисилоксана, модифицированное $SiO_2$	PE-CVD	161	4	0,03	Низкая	[4]
Текстурированная поверхность из анодированного алюминия	Анодирование, силанизация	150	4	70-120	Высокая	[5]
Текстурированная поверхность DLC ЛИ	PE-CVD	165	2	100-1200	Низкая	[6]
SLIPS на основе ПВДФ	Электроформование	162	12	2	Низкая	[7]
Покрытие, выделяющее антифриз	PE-CVD	162	20	1	Низкая	[8]
Покрытие, содержащее углеродные нанотрубки ПВДФ	Разделение фаз	166	-	2	Низкая	[9]

Существует множество методов, подходящих для создания супергидрофобной поверхности с учетом требований к ледофобности, каждый из которых имеет свои уникальные параметры. При выборе метода для разработки антиобледенительного покрытия, обладающего пьезоэлектрическими свойствами, следует учитывать как технические, так и экономические аспекты. С учетом этих факторов наиболее подходящим представляется метод текстурирования поверхности лазерным излучением (ЛИ).

Распространенными материалами для создания супергидрофобных поверхностей являются поливинилиденфторид (ПВДФ), полидиметилсилоксан (ПДМС), политетрафторэтилен (ПТФЭ), перфторполиэфир (ПФПЭ), этилен-тетрафторэтилен (ЭТФЭ). При выборе материала для антиобледенительного покрытия важно учитывать такие параметры, как стабильность к радиации, принимая во внимание, что на стандартной высоте полёта радиационный фон в 25 раз выше, чем над уровнем моря; диапазон рабочих температур, который должен быть ниже температуры, соответствующей высокому риску обледенения  $-20^{\circ}C$ ; наличие пьезоэлектрических свойств; величина модуля упругости Юнга, превышающая 1 ГПа.

Таблица 2

**Характеристики материалов**

	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости E, МПа	Температурный диапазон применения, °C	Пьезоэлектрические свойства	Радиационная стойкость
ПВДФ	1,78	1950	-30; +140	+	+
ПДМС	0,96	0,5	-50; +200	-	-
ПТФЭ	2,15	1500	-270; +260	-	-
ПФПЭ	2,00	3000	-260; +260	-	-



ЭТФЭ	1,70	1100	-100; +205	-	+
------	------	------	------------	---	---

Из рассмотренных материалов только ПВДФ одновременно обладает высокой радиационной стойкостью, высоким модулем упругости, имеет пьезоэлектрические свойства и вписывается в рабочий температурный диапазон, что делает его идеальным материалом для создания на его основе антиобледенительного покрытия.

### Экспериментальная часть

В качестве прибора лазерного микротекстурирования использовалась установка, состоящая из волоконного лазера YPLN-1-1x120-50-M и гальваносканирующей головки LScanXY с плоскопольным F-theta объективом, находящаяся в лаборатории лазерной химии института фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН НИЦ Курчатовский институт. Для получения изображений образцов использовался оптический микроскоп HRM-300 (Huvitz, Anyang, Южная Корея) и электронный микроскоп Phenom Pro X (Phenom-World BV, Netherlands). На образец поляризованной пленки ПВДФ (толщиной 50 мкм, PolyK, США) нанесена маркировка линий длиной 1 мм импульсным наносекундным (8 нс) ЛИ ИК диапазона (1064 нм) с частотой следования импульсов 750 кГц при энергии на единицу площади 9,5 Дж/см<sup>2</sup>. В результате получены локальные изменения внутри образца и частичная абляция материала с поверхности (рис. 1).

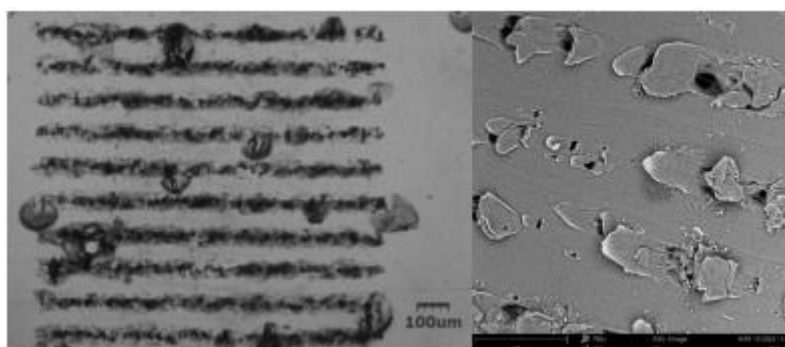


Рис. 1. Результаты маркировки: слева изображение с оптического микроскопа, справа – СЭМ поверхности

### Результаты и обсуждение

С помощью поверхностного лазерного микротекстурирования образца на основе ПВДФ получены параметры дорожек, потенциально пригодных для создания супергидрофобной поверхности. Будущие исследования будут ориентированы на совершенствование процесса микротекстурирования и проведение поляризации полученного текстурированного покрытия для придания ему пьезоэлектрических свойств.

### Заключение

В ходе исследования проведено сравнение характеристик и способов получения существующих антиобледенительных покрытий, а также представлены начальные результаты разработки покрытия на основе ПВДФ, которое сочетает в себе активный и пассивный методы борьбы с обледенением.

### Список литературы

1. Zha D.A. et al. Superhydrophobic polyvinylidene fluoride/graphene porous materials // Carbon N. Y. Pergamon, 2011. Vol. 49, № 15. P. 5166–5172.
2. Варанаси К.К. et al. Образование инея и адгезия льда на супергидрофобных поверхностях // Прикладная физика ... 2010.
3. Huang X. et al. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications // Prog. Aerosp. Sci. Pergamon, 2019. Vol. 105. P. 74–97.
4. Li J. et al. Anti-icing performance of a superhydrophobic PDMS/modified nano-silica hybrid coating for insulators // J. Adhes. Sci. Technol. 2012. Vol. 26, № 4–5. P. 665–679.
5. Leese H. et al. Wetting behaviour of hydrophilic and hydrophobic nanostructured porous anodic alumina // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. Elsevier, 2013. Vol. 420. P. 53–58.
6. Del Cerro D.A., Römer G.R.B.E., Huis In't Veld A.J. Erosion resistant anti-ice surfaces generated by ultra short laser pulses // Phys. Procedia. Elsevier, 2010. Vol. 5, № PART 1. P. 231–235.
7. Kim P. et al. Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance // ACS Nano. 2012. Vol. 6, № 8. P. 6569–6577.
8. Sun X. et al. Bioinspired Stimuli-Responsive and Antifreeze-Secreting Anti-Icing Coatings // Adv. Mater. Interfaces. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. Vol. 2, № 5. P. 1400479.
9. Wu T., Pan Y., Li L. Fabrication of superhydrophobic hybrids from multiwalled carbon nanotubes and poly(vinylidene fluoride) // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. Elsevier, 2011. Vol. 384, № 1–3. P. 47–52.

## МЕТОД ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПВДФ ПЛЕНОК

БАСОВ Б.А., МАКАРОВА К.Т., МОИСЕЕВ К. М., ОСИПКОВ А.С.

*МГТУ им. Н. Э. Баумана*

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод плазменной поляризации полимерных сегнетоэлектрических пленок поливинилиденфторида (ПВДФ). Проведено исследование по поляризации образцов ориентированной неполяризованной ПВДФ пленки Poly-K (США) размерами 20x20 мм в плазме тлеющего разряда в конфигурации двух плоских электродов при различных режимах. Продемонстрировано увеличение пьезокоэффициента  $d_{33}$  с 1,1 пКл/Н значения у неполяризованной пленки до 9,6 пКл/Н у образца, обработанного в течение 5 минут при расстоянии между электродами 20 мм и напряжении 4 кВ. Получены зависимости пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$  от параметров процесса поляризации (расстояние между электродами, размеры электродов, напряжение, время процесса).

*Ключевые слова:* ПВДФ, полимер, плазменная поляризация, плазма тлеющего разряда, пьезоэффект, пьезокоэффициент.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2022-0007)

### Введение

Полимерные сегнетоэлектрические пленки на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) являются перспективным материалом для использования в качестве активного элемента в таких областях промышленности, как гибкая электроника, оптоэлектроника, акустика, космическое приборостроение, альтернативная энергетика и медицина [1, 2]. Устройства на основе сегнетоэлектрических полимеров могут составить большую конкуренцию традиционным пьезоэлектрическим устройствам благодаря механической и технологической гибкости, высокой ударной вязкости, химической стойкости, высоким пробойным полям, прозрачностью и биосовместимости.

Работа устройств на основе ПВДФ пленок определяется их сегнетоэлектрическими свойствами (остаточная поляризация и пьезомодуль), которые, в свою очередь, связаны с

кристаллической структурой ПВДФ. Для эффективной работы устройств требуется высокая остаточная поляризация и высокий пьезомодуль полимера.

Способ обработки полимера может существенно влиять на ориентацию кристаллов, степень кристалличности, а также на образующиеся кристаллические фазы. Стандартный технологический маршрут изготовления полимерных сегнетоэлектрических пленок на основе ПВДФ выглядит так: формирование пленки, отжиг, ориентационная вытяжка, отжиг, поляризация. Основным этапом получения пленки является поляризация, так как именно в этом процессе пленка достигает наилучших пьезоэлектрических свойств, на которых работают все устройства.

Поляризация – это процесс ориентации диполей сегнетоэлектрической пленки под действием сильного электрического поля. Известно два применяемых в производстве пьезоэлектрической ПВДФ пленки метода поляризации: контактная поляризация и поляризация в коронном разряде [3]. Данные методы имеют недостатки: большая длительность процесса, низкая однородность поляризации, высокая вероятность пробоя, приводящая к браку (разрушению) пленки. Одним из вариантов решения этих проблем является метод плазменной поляризации, т.е. поляризации с использованием плазмы тлеющего разряда.

Первое упоминание такого способа поляризации приводится в статье Маккини и Дэвиса 1980 года [4]. В своих работах они применяют систему электродов, при которой подложкодержатель является анодом, а металлическая крышка вакуумной камеры, расположенная перпендикулярно аноду, является катодом. Результаты экспериментов показали возможность поляризовать ПВДФ пленки в плазме тлеющего разряда. Также в работе проведено исследование влияния подаваемого напряжения на величину остаточной поляризации. Однако дальнейшего развития исследования в данном направлении не получили.

Тем не менее, анализ возможностей и условий, обеспечиваемых методом плазменной поляризации, показывает, что он не только позволяет создавать более высокие поляризующие электрические поля без пробоя пленки, что приводит к ускорению процесса поляризации, но и повышает воспроизводимость результата за счет проведения процесса в вакууме. Кроме того, поскольку процесс плазменной поляризации происходит в вакууме, становится возможным совместить операцию поляризации с последующими операциями формирования нужной топологии на пленке, например электродов, контактных площадок, пассивных элементов, в едином вакуумном цикле. Таким образом, метод плазменной поляризации является недооцененным и может быть использован в промышленном производстве пьезоэлектрических датчиков на основе ПВДФ пленки.

Целью работы является подтверждение возможности поляризации в плазме тлеющего разряда в конфигурации двух плоских электродов, а также исследованию зависимости пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$  от расстояния между электродами, их размеров, напряжения, подаваемого на верхний электрод, и длительности процесса.

### **Материалы и методы**

В качестве образцов используется коммерческая ориентированная неполяризованная ПВДФ пленка производства Poly-K (США) толщиной 28 мкм и размерами 20x20 мм.

После обработки в плазме тлеющего разряда для измерения пьезоэлектрического коэффициента с двух сторон образцов ПВДФ пленки методом магнетронного распыления наносятся медные электроды круглой формы диаметром 10 мм и толщиной 300 нм.

Пьезокоэффициент  $d_{33}$  исследуемых образцов измеряется с двух сторон методом Берлинкура на измерительном приборе YE2730A (Sinocera Piezotronics, КНР) при калиброванной нагрузке 0,25 Н и частоте 110 Гц в 5 точках.

### **Экспериментальная часть**

Поляризация в плазме тлеющего разряда происходит в лабораторном стенде плазменной обработки МРС [5] при различных режимах, в которых варьируются расстояние между электродами, их площадь, напряжение, прикладываемое между электродами, а также время процесса обработки.

Расстояние между электродами варьируется от 20 до 40 мм – в данном диапазоне значений тлеющий разряд при давлении 4 Па горит стабильно и позволяет блоку питания обеспечивать напряжения от 3,3 до 4,0 кВ при максимальной силе тока 3,5 мА. При таких величинах напряжения разряда и толщине образцов 28 мкм за счет заряда частиц плазмы тлеющего разряда, закрепляющихся на поверхности пленки, в образце создается электрическое поле более 100 МВ/м, что превышает величину коэрцитивного поля ПВДФ, равную 50 МВ/м, и следовательно, ориентирует диполи ПВДФ пленки вдоль поля.

Помимо расстояния между электродами варьируется размер электродов от 105x105 мм до 140x100 мм, тем самым изменяется плотность тока заряженных частиц, которые образуют заряд на поверхности обрабатываемого образца в условиях одинаковой силы тока, подаваемой на верхний электрод.

Время также является важным фактором в процессе поляризации, так как при малой длительности обработки эффективность поляризации мала, а при длительной обработке, например, в течение 10 минут образцы пленки могут деградировать из-за локального перегрева поверхности, взаимодействующей с заряженными частицами плазмы тлеющего разряда.

Образцы располагаются на нижнем электроде установки. Камера откачивается до давления 4 Па, и зажигается плазма тлеющего разряда при постоянном напряжении 3,3 и 4 кВ.

Пьезокоэффициент  $d_{33}$  поляризованных образцов с предварительно нанесенными с обеих сторон медными электродами измеряется с помощью  $d_{33}$ -метра в 5 точках, после чего вычисляется среднее значение пьезокоэффициента. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента по поляризации в плазме тлеющего разряда

№	Расстояние между электродами, мм	Размер электродов, мм	Давление, Па	Напряжение, кВ	Время, мин	Среднее значение $d_{33}$ , пКл/Н	
						Сторона	
						1	2
0	Необработанная ПВДФ пленка с нанесенными электродами					1.1	1.1
1	20	105x105	4	4,0	5	9,2±1,4	5,6±0,8
2					4	8,6±0,9	5,8±1,2
3					3	3,8±0,4	3,4±0,7
4	40	105x105	4	3,3	5	4,0±0,4	1,9±1,0
5					4	2,8±0,7	1,6±0,2
6					3	2,5±0,4	1,1±0,5
7	20	140x100	4	4,0	5	6,4±0,7	3,1±1,4
8					4	5,0±1,1	2,7±0,8
9					3	3,1±0,2	1,4±0,6
10	40	140x100	4	3,3	5	3,6±0,4	2,0±0,2
11					4	3,0±0,7	1,9±0,3
12					3	2,9±0,4	1,7±0,3

Результаты и обсуждения

Увеличение расстояния между электродами с 20 до 40 мм приводит к смещению ВАХ разряда, из-за чего напряжение снижается с 4,0 до 3,3 кВ при том же значении силы тока 3,5 мА, что приводит к снижению эффективности процесса поляризации более чем в 2 раза.

Прослеживается прямая зависимость значения пьезомодуля  $d_{33}$  от длительности процесса поляризации – увеличение времени поляризации ведет к повышению отклика образца с обеих сторон. Эффективность процесса поляризации значительно повышается при увеличении времени обработки с 3 до 4 минут. Обработка пленок заряженными частицами плазмы тлеющего разряда в течение 5 минут незначительно повышает отклик по сравнению с режимом обработки длительностью в 4 минуты, что может свидетельствовать о приближении к пороговому значению времени процесса поляризации, при котором дальнейшее его увеличение не приносит значимого прироста пьезомодуля  $d_{33}$  пленки.

Результаты эксперимента также указывают на прямое влияние плотности потока заряженных частиц, зависящей от площади электродов в условиях одинаковой силы тока, подаваемой на верхний электрод, на эффективность процесса поляризации. Максимальное значение пьезокоэффициента  $d_{33}$  для режимов, в которых применяются электроды размерами 105x105 мм, составляет 9,2 пКл/Н в то время, как для режимов, в которых используются электроды 140x100 мм, максимальное значение  $d_{33}$  составляет 6,4 пКл/Н.

### Заключение

Продемонстрировано увеличение величины пьезокоэффициента  $d_{33}$  с 1,1 пКл/Н у неполяризованной пленки до 9,6 пКл/Н у образца, обработанного в плазме тлеющего разряда в течение 5 минут при расстоянии между электродами 20 мм и напряжении 4,0 кВ. Это подтверждает возможности рассматриваемого метода для поляризации гибких сегнетоэлектрических ПВДФ пленок.

Установлено, что увеличение напряжения, длительности процесса и уменьшение расстояния между электродами приводит к увеличению значения пьезоэлектрического коэффициента  $d_{33}$ . Таким образом, варьирование параметров позволяет подбирать необходимые условия для поляризации материалов различной толщины. Фактор времени поляризации пленки также оказывает прямое влияние на ее значение пьезоотклика.

Тем не менее, на величину пьезокоэффициента, кроме рассмотренных параметров процесса поляризации, могут оказывать влияние и другие, например, давление, соотношение площадей металлического электрода и пленки, которые могут оказывать существенное влияние как на условия накопления заряда на поверхности пленки, так и на структуру самой пленки. Все это свидетельствует о необходимости более детального исследования и поиска эффективных режимов процесса поляризации с использованием плазмы тлеющего разряда.

### Список литературы

1. Кочервинский, В.В. Применение сегнетоэлектрических полимеров в технике и медицине / В. В. Кочервинский, О. В. Градов, М. А. Градова. – М.: Palmarium Academic Publishing, 2021. – 205 с.
2. Кочервинский, В.В. Свойства и применение фторсодержащих полимерных пленок с пьезо- и пироактивностью / В.В. Кочервинский. – М.: Успехи химии, 1994. – С. 383-388.
3. Tim R. Dargaville, В.В. Characterization, Performance and Optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror Concepts / В.В. Tim R. Dargaville, Sandia National Laboratories, 2005. – 49 p.
4. J.E. McKinney, Plasma poling of poly(vinylidene fluoride): Piezo- and pyroelectric response / J.E. McKinney. – Saint Louis: National Bureau of Standards, 2001. – P. 1676-1681.
5. Сергеева, А.Е. Поляризация и пространственный заряд в сегнетоэлектрических полимерах / А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов; Одесская национальная академия пищевых технологий. – Одесса: типография ТЭС, 2014. – 346 с.
6. Басов, Б. А. Разработка системы электродов для поляризации ПВДФ пленок в малогабаритной плазменной установке / Б. А. Басов, К. М. Моисеев // Вакуумная техника и технология: Материалы Одиннадцатой Российской студенческой научно-технической конференции, Казань, 18–20 апреля 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 154-155.

## СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ В СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Бобков А.А.<sup>1</sup>, Козодаев Д.А.<sup>2</sup>, Мошников В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup> ООО «НТ-МДТ» Зеленоград

**Аннотация.** В работе рассмотрены новые возможности повышения уровня профессиональных знаний студентов и аспирантов по применению и развитию методов сканирующей зондовой микроскопии, появившиеся в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» после открытия Центра сканирующей микроскопии.

*Ключевые слова:* сканирующей зондовой микроскопии, атомно силовая микроскопия, функциональные наноматериалы, материаловедение микро- и наносистем.

С появлением первых методов сканирующей зондовой микроскопии (сканирующей туннельной микроскопии и атомно силовой микроскопии), образно говоря, у ученых появились глаза и руки в наномире. В 1986 году Рорер и Биннинг были удостоены Нобелевской премии. В течение короткого времени развитие методов привело к созданию самостоятельных направлений – наноскопии поверхностных свойств, наноспектроскопии, новых видов нанотехнологий (локального анодного окисления, нанотехнологий погруженного пера, силовой нанолитографии и др.), а также методов манипулирования атомами, молекулами, нанотрубками, наночастицами. Подробнее с этими вопросами можно ознакомиться по учебным пособиям, изданным в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» [1-5].

При этом, непрерывно увеличивается количество методов сканирующей зондовой микроскопии, обеспечивающей исследования различных свойств в наномасштабе. Среди таких методов и методик, представляющих особый интерес для наноэлектроники, наносенсорики, нанооптоэлектроники и фотокатализа, прежде всего выделим методики измерения электрофизических свойств (токи растекания, вольт-амперные характеристики, метод зонда Кельвина, распределение ёмкости и др.), методики магнитной силовой микроскопии, методики анализа ионной проводимости, а также методики ближнепольной оптической микроскопии с возможностью анализа рамановских сдвигов в нанобластях.

Для исследователей, занимающихся вопросами атомно молекулярного дизайна и наноархитектоники надмолекулярных структур уникальные возможности обеспечивает развитие прыжковой моды (Hybrid Mode). В этой моде снимается серия аналитических откликов по изменению взаимодействия зонда сканирующего микроскопа при подводе и отводе кантилевера в режиме частот ниже резонансной. В результате исследователи получают информацию о рельефе поверхности в режимах притяжения и отталкивания; модуль Юнга, адгезию и работу адгезии, проводимость, латеральный и вертикальный пьезоотклик, температуру и теплопроводность и т.д.

Все перечисленные методики стали доступными для студентов и аспирантов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» после открытия в декабре 2023 г. совместного центра сканирующей микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и Группы компаний ООО «НТ-МДТ».

Среди целей и задач, стоящих перед Центром, подготовка высокопрофессиональных специалистов в области сканирующей зондовой микроскопии для Группы компаний ООО «НТ-МДТ» и организаций, эксплуатирующих их оборудование. Также, в задачи Центра входит усиление выполняемых исследовательских работ и диссертаций.

Следует отметить, что сотрудники Центра будут активно участвовать в развитие новых функциональных возможностей сканирующей зондовой микроскопии

В настоящее время значительно усиливается практическая лабораторная подготовка обучающихся в Центре. Намечено издание 3 учебных пособий. Первое пособие - учебный лабораторный практикум состоит из 6 работ, направленных на укрепление знаний о приборах сканирующей зондовой микроскопии, развитии умения обучающихся оценивать особенности проведения эксперимента и овладения навыков грамотного использования технических возможностей приборов в наномасштабных измерениях. К настоящему времени этот лабораторный практикум (под редакцией руководителя Группы компаний ООО «НТ МДТ» Козодаева Д.А. и директора Центра к.т.н. Бобкова А.А.) подготовлен к печати.

Базовой книгой, положенной в основу лабораторного практикума по изучению основных типов зондовых микроскопов, является учебное пособие В.Л. Миронова [6], в котором рассмотрены принципы работы основных типов зондовых микроскопов

(сканирующего туннельного микроскопа, атомно-силового микроскопа, электросилового микроскопа, магнитно-силового микроскопа, ближнепольного оптического микроскопа), наиболее широко используемых в научных исследованиях.

Ведется подготовка второго учебного пособия с использованием новых методик сканирующей зондовой микроскопии для материаловедов.

Третье учебное пособие будет содержать обобщённые результаты по оригинальным методикам сканирующей зондовой микроскопии, полученным в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с 2008 года при выполнении диссертационных работ.

С более подробным содержанием работ, проводимых в ООО «НТ МДТ» и в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» можно ознакомиться [7-19].

В заключении, отвечаем на наиболее часто задаваемый вопрос: «Возможно ли пройти подготовку в Центре?». Ответ: «Возможно. Количество мест определяется способностью осуществлять индивидуальную подготовку с прикрепленными сотрудниками Центра на выделенных установках по составленному графику, утвержденного директором Центра.»

### Список литературы

1. Мошников В. А., Федотов А. А., Румянцева А. И. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро-и нанoeлектронике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 84 с.
2. Мошников В.А., Спивак Ю.М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: учеб. пособие, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 78 с.
3. Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
4. Диагностика материалов методами сканирующей зондовой микроскопии // монография под ред. Мошникова В.А., Санкт-Петербург, 2012, 172 с.
5. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование // под ред. Мошников В.А., Александрова О.А. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.
6. В. Л. Миронов Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. - Нижний Новгород: . Институт физики микроструктур РАН, 2004, 114 с.
7. New diagnostic techniques for incorporated porous materials / Korepanov O.A., Moshnikov V.A., Kozodaev D.A., Spivak Y.M. // В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022. С. 975-977.
8. Флуоресцентный зондовый датчик на основе ККТ систем I-III-VI / Козодаев Д.А., Корепанов О.А., Мошников В.А. // В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2022. С. 154-155.
9. Мульти-модальный конфокальный микроспектрометр нового поколения для многофотонных оптических экспериментов на наномасштабе / Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А. // В книге: Комбинационное рассеяние - 95 лет исследований. Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света. Москва, 2023. С. 23.
10. Современные экспериментальные и инженерные технологии для зондово-оптических измерений характеристик поверхности на наномасштабе / Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. // В книге: ФОТОНИКА 2023. Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых). Москва, 2023. С. 74.
11. Аперидическая дифракционная решетка на основе распределения нулей  $\zeta$ -функции Римана / Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., Мошников В.А. // В сборнике: HOLOEXPO 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 69-73.
12. Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов / Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. // В сборнике: HOLOEXPO 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 125-126.



13. Тестовые структуры на гетероэпитаксиальных слоях PbTe(111)-on-Si со ступенчатым характером субмикронного рельефа поверхности / Козодаев Д.А., Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М., Мошников В.А. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. № 15. С. 127-134.
14. Современные научные инструменты для наномасштабных исследований ферроэлектрических материалов / Козодаев Д.А., Нестеров С.И., Трусов М.А. // В книге: XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы. Тверь, 2023. С. 30.
15. TEMPERATURE- AND SIZE-DEPENDENT PHOTOLUMINESCENCE OF CUINS<sub>2</sub> QUANTUM DOTS / Korepanov O.A., Kozodaev D.A., Aleksandrova O.A., Bugrov A., Firsov D.D., Kirilenko D., Mazing D.S., Moshnikov V.A., Shomakhov Z.V. // Nanomaterials. 2023. Т. 13. № 21. С. 2892.
16. Исследование наноразмерных структур с использованием эффекта внутреннего трения / Новиков И.А., Козодаев Д.А., Мошников В.А. // В книге: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. Тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 30.
17. Современные научные инструменты для наномасштабных исследований магнитных материалов / Козодаев Д.А., Костромин С.В., Трусов М.А. // В книге: VIII Всероссийская конференция по наноматериалам. Сборник материалов конференции. Москва, 2023. С. 19-20.
18. Лазерная и микроспектральная техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов / Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. // В сборнике: Невская фотоника-2023. Всероссийская научная конференция с международным участием сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 2023. С. 29.
19. Polyvinylpyrrolidone as a stabilizer in synthesis of AgInS<sub>2</sub> quantum dots / Korepanov O.A., Aleksandrova O.A., Firsov D.D., Kalazhokov Z.Kh., Kirilenko D.A., Kozodaev D.A., Matveev V., Mazing D.S., Moshnikov V.A. // Nanomaterials. 2022. Т. 12. № 14. С. 2357.

## МИКРОФЛЮИДНЫЙ ЧИП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ НАНОЧАСТИЦ В СУСПЕНЗИИ

БОГДАНОВА М.В.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Статья посвящена разработке микрофлюидного чипа для измерения коэффициентов диффузии наночастиц в суспензии. Опытные образцы изготовлены в виде сэндвич-структур методом лазерной абляции полимерных пленок из полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 0,3 мм с последующей термокомпрессионной сваркой слоев. Испытания систем проводились на примере щелочного раствора флуоресцеина и водного раствора красителя Coomassie Brilliant Blue R-250.

*Ключевые слова:* микрофлюидика, микрофлюидные чипы, измерение коэффициентов диффузии

Микрофлюидика (микрогидродинамика) как междисциплинарная наука основывается на изучении гидродинамики жидкостей в проточных микросистемах. Технология микрофлюидики приобрела известность в 90-х годах [1] и в настоящее время находит применение во множестве различных приложений, среди которых особенно важны биологические и биомедицинские [2]. В своем развитии она тесно связана с совершенствованием микро- и нанотехнологий, позволяющих осуществлять моделирование природных процессов и проводить прецизионный анализ объектов различной природы.

Технологии микрофлюидики используются для создания разнообразных микрофлюидных устройств и, так называемых, микрофлюидных чипов (МФЧ). МФЧ представляет собой миниатюрное гибридное устройство, предназначенное для различных многостадийных процессов химического, биохимического или микробиологического анализа, использующее микро- и нанообъемы образцов для проведения пробоподготовки и измерений. Эти устройства обычно изготавливаются с помощью технологий микросистемной техники, планарной и гибридной технологий микроэлектроники и

принципов миниатюризации. МФЧ используются для разработки и испытаний лекарственных препаратов и их доставки, обнаружения и идентификации биомолекул, моделирования различных органов и их свойств, секвенирования нуклеиновых кислот, тестирования антибиотикорезистентности бактерий, изучения токсичности веществ и механизмов их действия на живые ткани и многих других целей.

Актуальной задачей для многих технических наук, среди которых: коллоидная и аналитическая химия, материаловедение (особенно исследование полимерных материалов), медицина и фармакология, а также пищевая промышленность и другие; является измерение коэффициентов диффузии молекул и частиц в жидкой среде. В настоящее время это исследование является сложным, дорогостоящим, длительным и малодоступным. Оно зачастую проводится на громоздком лабораторном оборудовании, имеющемся в основном только в лабораториях, исследующих полимерные материалы. МФЧ, напротив, представляют собой портативные, легкие и компактные системы, в которых анализ проводится быстро и эффективно благодаря эффектам. При этом МФЧ отличаются тем, что не требуют большого количества вещества для проведения анализа, а также могут быть изготовлены большими партиями из биоразлагаемых материалов и утилизироваться без вреда для окружающей среды.

В отличие от макро- масштабов перемешивания жидкости, которое достигается почти всегда за счет нестационарности и даже турбулентности потоков [3], в каналах микрофлюидных систем течение характеризуется малым значением числа Рейнольдса ( $Re < 10$ ) и, соответственно, ламинарностью. В таком случае смешивание жидкости достигается благодаря диффузионному транспорту, который зависит от параметров диффундирующих частиц [3]. При таком пассивном массообмене ламинарные потоки стабильны, и граница фаз между ними сохраняется при течении жидкости. Таким образом, в образовании гомогенного раствора роль играет только диффузионное смешивание в канале, которое имеет пространственные ограничения и требует длительного времени. Поэтому проведение диффузионного смешивания эффективно для низкомолекулярных веществ в каналах с малой площадью поперечного сечения, большой длиной и значительной площадью границы раздела фаз [3]. Однако, в технических и биомедицинских задачах существенно больший интерес представляет измерение коэффициентов диффузии макромолекул, белков и наночастиц. В этом случае проявляется существенное преимущество микрофлюидных систем, позволяющих работать в рабочих объемах микромасштаба, сокращая время диффузии до приемлемых величин.

Классический метод изучения вещества с помощью измерения диффузии более применим в области малых ( $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Да) молекулярных масс, где методы светорассеяния и седиментации оказываются непригодными [2]. К преимуществам этого метода относится изучение частиц в их естественном состоянии при отсутствии внешнего воздействия, что позволяет получить более надежные сведения о структуре частицы, чем у остальных методов. Однако, МФЧ для измерения коэффициентов диффузии представляют собой сложные системы, создание и использование которых связано с несколькими нетривиальными аспектами:

1) для создания МФЧ необходимо разработать не только подсистему диффузионного смешения, но и подсистемы ввода/вывода вещества, подсистему транспорта вещества, систему наблюдения диффузии и другие подсистемы, а также обеспечить их совместную эффективную работу;

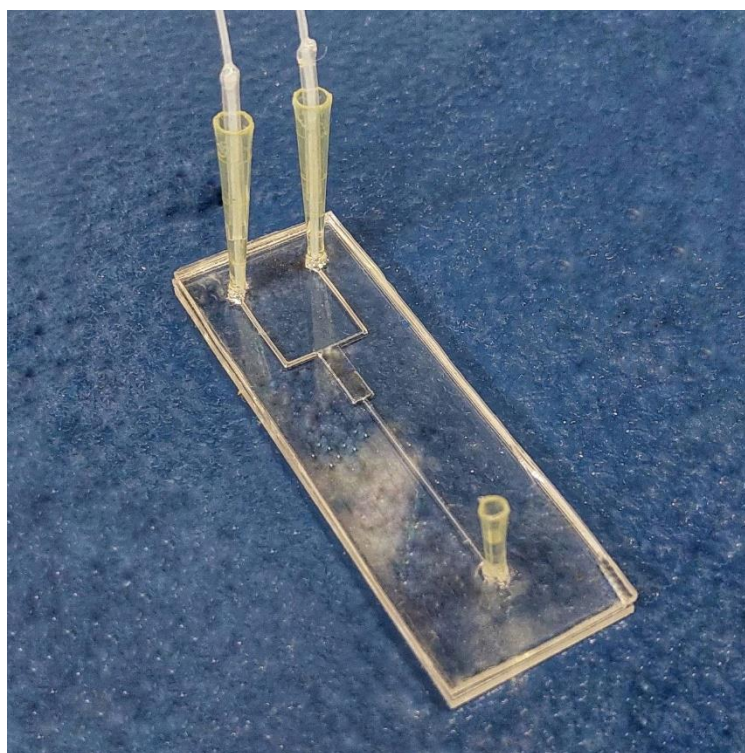
2) МФЧ также часто требуют интеграции с микроэлектроникой и оптикой, что усложняет разработку и использование этих систем;

3) необходимые для функционирования чипа микроканалы и структуры с высоким аспектным отношением требуется получить с высокой точностью, что является непростой задачей;

4) для изучения диффузии необходимо наличие стабильной границы раздела фаз между ламинарными потоками, что требует высокоточных систем создания и поддержания постоянного во времени течения;

5) для анализа полученных результатов требуется калибровка приборов, а также специальные методы обработки данных и математические модели диффузии частиц.

Для данной работы изготовлена партия МФЧ с пассивными микромиксерами различных топологий по технологии лазерной абляции полимеров, которая показала высокое качество формирования микроканалов с гладкими вертикальными стенками. В качестве материала чипов был выбран полиметилметакрилат (ПММА) из-за его отлично подходящих для целей микрофлюидики свойств (прозрачности, химической инертности, простоты обработки, механической прочности и биосовместимости). Для ввода образцов были изготовлены конические входные резервуары, в которые с помощью полимерных капилляров с диаметром 30 мкм из резервуаров для загрузки поступали реагенты. Готовый к использованию МФЧ показан на рисунке 1.



*Рис. 1. МФЧ для измерения коэффициентов диффузии наночастиц в суспензии*

Работоспособность изготовленных МФЧ проверялась на примере 0,1% щелочного раствора флуоресцеина, вещества, обладающего флуоресценцией – это разновидность люминесценции, преобразовывающей ультрафиолет в цвета видимой части спектра. Данное свойство помогло четко отследить движение потоков внутри МФЧ и убедиться в отсутствии дефектов системы.

Таким образом, в настоящей работе были разработаны и изготовлены МФЧ для измерения коэффициентов диффузии, которые отличаются миниатюрностью и удобством использования. Данные системы будут использованы для изучения смешения жидкостей на микроуровне в магистерской работе автора, который выражает глубокую благодарность своему научному руководителю – Зиминой Татьяне Михайловне, и рецензенту данной статьи – Ситкову Никите Олеговичу!

### Список литературы

1. Manz, A., Graber, N. and Widmer, H.Á., 1990. Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing. *Sensors and actuators B: Chemical*, 1(1-6), pp.244-248.
2. Зиминая Т.М., Гвоздев Ю.А., Ширинян Т.В. Лаборатории-на-чипе: современное состояние // *Биотехносфера*. 2014. №6. С. 41-66.
3. Гвоздев, Ю. А., Хафизов, Р. А., Гаммадов, Ш. М., Каблуков, Д. Е., Соловьев, А. В., Зиминая, Т. М., Кузнецова Н. В., Цветков, Б. Н. Элементы микрогидравлической логики в лабораториях на чипе // *Биотехносфера*. 2013. №. 6 (30). С. 2-15.
4. Цветков В. Н., Эскин В. Е., Френкель С. Я. Структура макромолекул в растворах // М: Наука. 1964. С. 718.

## МИКРОКАНАЛЬНАЯ ПЛАСТИНА С ПОВЫШЕННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТЬЮ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭОП

БРИЛЛИАНТОВ В.Д.

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана*

**Аннотация.** В статье предложен перспективный способ защиты фотокатода от электронно-стимулированного газовыделения из микроканальной пластины путём нанесения внутриканальной тонкой плёнки оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения, приводится оценка режимов нанесения исходя из кинетической теории газов.

*Ключевые слова:* приборы ночного видения, электронно-оптические преобразователи, микроканальные пластины, ионно-барьерная плёнка, внутриканальная плёнка, защита фотокатода, атомно-слоевое осаждение

### Введение

В современных электронно-оптических преобразователях (ЭОП) III поколения роль умножителя фотоэлектронов выполняет микроканальная пластина (МКП). Она позволяет увеличить входной сигнал в сотни и тысячи раз. Благодаря появлению МКП стало возможно использовать приборы ночного видения (ПНВ) даже в условиях почти полного отсутствия естественного освещения.

В ЭОП III поколения для защиты фотокатода на основе GaAs от электронно-стимулированного газовыделения (ЭСГ) из МКП используется ионно-барьерная плёнка (ИБП), нанесённая на торцевую поверхность МКП со стороны фотокатода. Без ИБП срок эксплуатации прибора снижается до нескольких десятков часов. Однако, ИБП во многом лимитирует характеристики ЭОП: снижает отношение сигнал шум, увеличивает размер ореола вокруг изображения ярких источников света.

Целью работы является разработка перспективного способа защиты фотокатода от ЭСГ из МКП путём нанесения тонкой внутриканальной плёнки (ВКП) оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения (АСО).

### Электронно-оптические преобразователи III поколения

Важнейшее применение ЭОП на сегодняшний день – в составе ПНВ для наблюдения объектов в ночное время суток. ПНВ в большей степени является неотъемлемым атрибутом современных вооружённых сил. Также ЭОП применяются для преобразования рентгеновских изображений и регистрации ядерных, излучений [1].

Работа современного ЭОП (рисунок 1) для ПНВ основана на процессе преобразования инфракрасного излучения в видимое по следующей схеме: высвобождение электронов из мишени (фотокаатода) в результате ее взаимодействия с фотонами ИК излучения (внешний фотоэффект) — умножение и перенос электронов к экрану электрическим полем — катодолюминесценция (обратный эффект), при которой фотоэлектроны, бомбардирующие катодолюминесцентный экран, создают фотоны видимого спектра [2].

МКП – важнейший элемент современного ЭОП. Она выполняет роль умножителя фотоэлектронов, позволяющего увеличить входной сигнал в сотни и тысячи раз. Благодаря появлению МКП стало возможно использовать ПНВ даже в условиях отсутствия лунного и звёздного освещения.

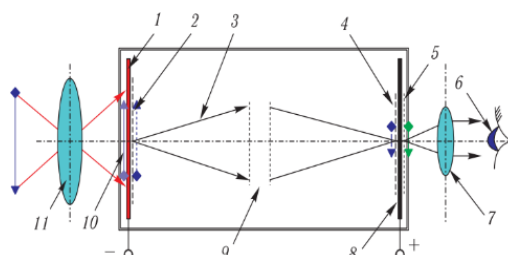
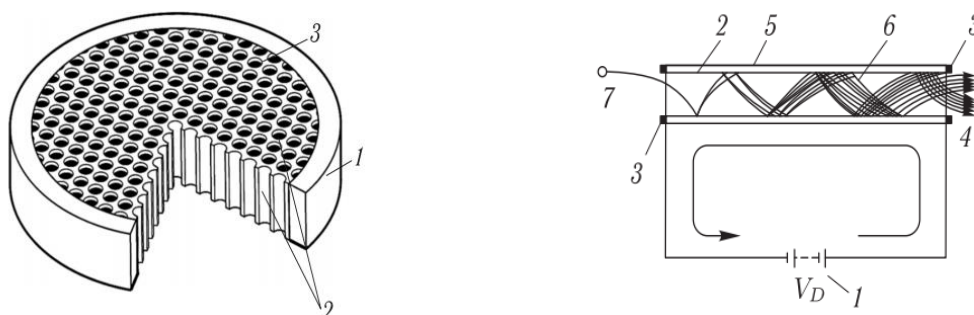


Рис. 1. Принцип действия ЭОП: 1 — фотокаатод; 2 — электронное изображение на фотокаатоде; 3 — траектории электронов; 4 — электронное изображение на экране; 5 — оптическое изображение на экране; 6 — глаз наблюдателя; 7 — окуляр; 8 — катодолюминесцентный экран; 9 — фокусирующая электронно-оптическая система; 10 — оптическое изображение на фотокаатоде; 11 — объект

Структура МКП схематически показана на рисунке 2 а. Она состоит из большого числа сквозных параллельных каналов в тонкой стеклянной пластинке. Внутренняя поверхность каналов представляет собой слой с определенной проводимостью и коэффициентом вторичной электронной эмиссии  $\delta > 1$ . На обе торцевые поверхности МКП нанесены низкоомные металлические слои. Разность потенциалов, создает осевое электрическое поле во всех каналах. Фотоэлектрон, вылетая из фотокаатода, попадая в канал и многократно ударяясь об его стенку, вызовет появление вторичных фотоэлектронов, которые, двигаясь в поле в радиальном направлении, вызывают появление новых вторичных электронов (рисунок 2 б). Количество электронов внутри канала лавинно нарастает, пока не кончится канал [1, 2].



а)

б)

*Рис. 2. а) Схематическое изображение МКП: 1 — стеклянная пластина; 2 — каналы; 3 — низкоомный металлический слой; б) движение электронов в прямом канале: 1 — внешний источник тока; 2 — резистивный вторично-эмиссионный слой на поверхности канала; 3 — покрытые низкоомным слоем торцы канала; 4 — вылетающие из канала электроны; 5 — стеклянная трубка канала; 6 — траектория электронов внутри каналов; 7 — влетающий в канал электрон*

В толще стекла, из которого изготовлено МКП, присутствуют растворенные газы (окись и двуокись углерода, водород, метан, группы OH), а также оксиды щелочных металлов, которые, диффундируя к поверхности каналов, образует на них кластеры соединений натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHSiO}_3$ ). При работе ЭОП соединения натрия и газы под действием падающих электронов распадаются на ионы, что приводит к появлению ЭСГ. Положительные ионы в электрическом поле летят в сторону фотокатода из GaAs, бомбардируют его и нарушают его структуру, что приводит снижению чувствительности фотокатода и выходу из строя прибора. В статье [3] приводится оценка скорости ЭСГ, при котором фотокатод остаётся в рабочем состоянии необходимый промежуток времени (долговечность):  $n_i/n_e \leq 5 \cdot 10^{-5}$  (ион/электрон).

#### **Ионно-барьерная плёнка для защиты фотокатода**

В ЭОП III поколения для защиты фотокатода от ЭСГ из МКП используется ИБП, нанесённая на торцевую поверхность МКП со стороны фотокатода. Плёнку из  $\text{SiO}_2$ , либо  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной порядка 5 нм наносят на органическую плёнку (ОП) методом резистивного испарения с отнесением источника от МКП на большое расстояние. ИБП снижает поток газовой выделенной, который попадает в катодный промежуток более, чем в 15 раз [4]. Большая толщина не пробивается фотоэлектронами в достаточном количестве, что приводит к потере сигнала в ИБП, меньшая – имеет большое количество «дырок», что не обеспечивает достаточного снижения потока газовой выделенной.

Однако использование ионно-барьерной пленки имеет и отрицательные стороны. Ее применение ухудшает такие характеристики ЭОП, как отношение сигнал/шум, разрешение, ореол, частотно-контрастную характеристику, уровень темнового фона, что снижает качество изображения и уменьшает дальность действия прибора [5].

#### **Внутриканальная плёнка для защиты фотокатода**

Предлагается способ изготовления МКП с повышенной долговечностью для ЭОП III поколения, который нивелирует эффект ЭСГ, тем самым позволяя отказаться от использования ИБП в ЭОП.

Так, для устранения ЭСГ на внутреннюю поверхность каналов МКП наносится равномерная тонкая плёнка оксида алюминия методом атомно-слоевого осаждения (АСО), которая выступает барьером для ионов и одновременно является вторично-эмиссионным слоем с большим коэффициентом вторичной эмиссии.

Атомно-слоевое осаждение (Atomic Layer Deposition, ALD) - циклический процесс нанесения тонких пленок материалов на поверхность субстрата с атомарной точностью, основанный на поверхностно-контролируемых и самонасыщаемых химических реакциях и/или адсорбционных процессах между поверхностью и газовыми прекурсорами.

АСО, по своей сути, – это разновидность химического метода осаждения из газовой фазы (CVD). Процесс АСО состоит из последовательных циклов. В каждом цикле сначала на поверхность субстрата подается один из прекурсоров, который взаимодействует с поверхностью и создает мономолекулярный слой. Затем избыток реагента удаляется,

например, путем продувки инертным газом. После этого второй реагент подается для реакции с предыдущим слоем и создания следующего мономолекулярного слоя. Этот цикл повторяется, пока не достигнута желаемая толщина пленки [6 - 9].

Основное преимущество АСО перед обычным способом проведения реакции CVD, в том, что исключается взаимодействие реагентов в газовой фазе и достигается прецизионный контроль толщины наносимого слоя материала с около 100% конформностью.

Ввиду большого аспектного отношения иные методы нанесения ТП не обеспечивают должной конформности и однородности покрытия [10].

Этапы цикла АСО при осаждении плёнки  $Al_2O_3$  [9] приведены на рисунке 3.

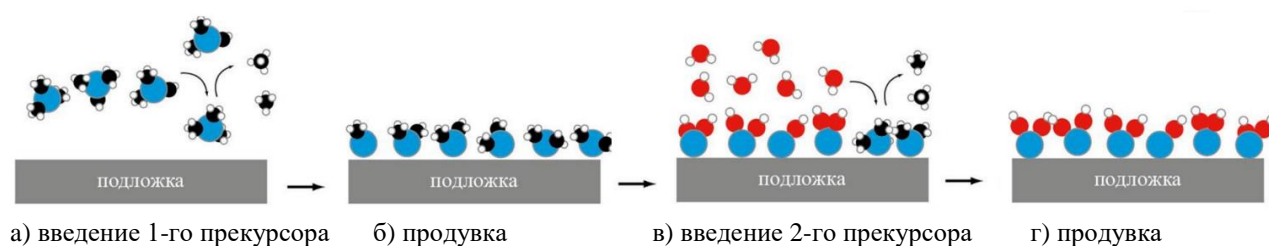
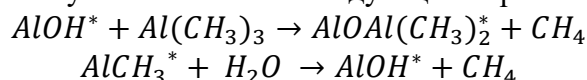


Рис. 3. 4 этапа одного цикла АСО

Поверхностные реакции могут быть описаны следующей парой выражений:



На данный момент самым верным способом контроля покрытий на каналы является анализ с помощью СЭМ на поперечном сколе МКП [10].

Кинетическая теория дает поток осаждения  $J$  на поверхность, как показано в уравнении 1 [11, 12].

$$J = \frac{P}{\sqrt{2\pi m k T}} [m^{-2}c^{-1}] \quad (1)$$

$P$  - парциальное давление прекурсора у поверхности [Па];  $m$  – масса молекулы [кг];  $k$  - постоянная Больцмана [ $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К];  $T$  - температура [К].

На основе уравнения 1 было получено выражение для величины экспозиции, необходимой для полного покрытия боковых стенок отверстия.

$$P\tau_{отв} = \sigma \sqrt{2\pi m k T} \left(4a + \frac{3}{2}a^2\right) \quad (2)$$

$\sigma$  – плотность осаждённых частиц ( $m^{-2}$ );  $a$  – аспектное отношение.

Коэффициент  $\sigma \sqrt{2\pi m k T}$  в уравнении 2 - это экспозиция, необходимая для насыщения плоской поверхности. Член  $(4a + (3/2)a^2)$  - коэффициент, на который нужно увеличить экспозицию, чтобы полностью покрыть отверстие с аспектным отношением  $a$ . Например, отверстие с соотношением сторон 43 требует экспозиции в 3000 раз больше, чем плоская поверхность.

Так рассчитано, что для осаждения оксида алюминия на стенки каналов МКП с  $a = 50$ , при  $T = 473 K$ , значение  $P\tau_{отв100\%} = 2,24 (Па \cdot c) = 16790 (Л)$  при 100% вероятности реакции, для 7% вероятности реакции  $P\tau_{отв7\%} = 32 (Па \cdot c) = 239861 (Л)$ .

Компанией Arradiance уже был разработан способ нанесения АСО на поверхности каналов МКП с улучшенной вторичной эмиссией (рисунок 1) [13].



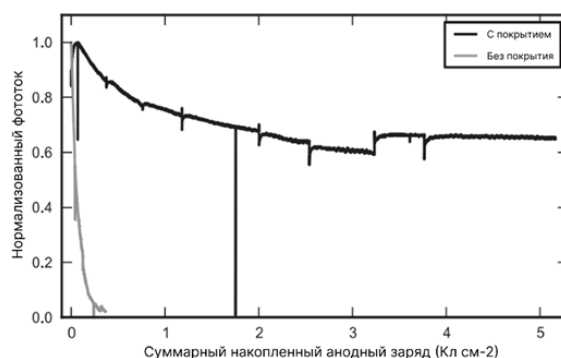


Рис. 4. Выходной фототок МКП с покрытием и без в течение всего срока службы, построенный как функция общего заряда

На базе АО «НПО Геофизика-НВ» совместно с ЦКП «МИЭТ» были проведены опыты по нанесению плёнки оксида алюминия на внутреннюю поверхность каналов МКП методом АСО. Полученные пластины были использованы для изготовления опытной партии ЭОП, которая в настоящий момент проходит испытания на долговечность приборов.

### Заключение

Метод атомно-слоевого осаждения, позволяет получать очень конформные и ультратонкие пленки на подложках с высоким аспектным отношением. Очень перспективны изыскания в области применения АСО для осаждения защитных покрытий на высокоаспектные структуры, в том числе на стенки каналов микроканальных пластин для их применения в «бесплёночных» ЭОП. Разработанная методика оценки параметров осаждения плёнок с помощью АСО может быть полезна при изготовлении электронно-оптических преобразователей, различных структур для микроэлектроники, а также в других областях, требующих нанесения покрытий на структуры с высоким аспектным отношением.

### Список литературы

1. Иванов В. Я. Методология компьютерного проектирования микроканальных усилителей. – 2019.
2. Грузевич Ю. Оптико-электронные приборы ночного видения. Litres, 2022.
3. Локтионов В. И., Багдурев Р. И. Высокая наукоемкая серийная технология финишной очистки экранно-корпусного узла электронно-оптических преобразователей с прямым переносом изображения //Прикладная физика. – 2005. – №. 5. – С. 102-106.
4. Аксенов В. В. СПОСОБ ГРУППОВОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 3 ПОКОЛЕНИЯ БЕЗ ИОННО-БАРЬЕРНОЙ ПЛЕНКИ МЕТОДОМ ПЕРЕНОСА И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ.
5. Долотов А. С., Коновалов П. И. Способы повышения долговечности фотокатодов ФЭУ с МКП и их экспериментальное исследование //XXV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – 2018. – С. 143-146.
6. Соснов Е. А., Малков А. А., Малыгин А. А. Нанотехнология молекулярного наслаивания в производстве неорганических и гибридных материалов различного функционального назначения (обзор). I. История создания и развития метода молекулярного наслаивания //Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94. – №. 8. – С. 967-985.
7. Алябьев А. Ю. Применение технологии атомно-слоевого осаждения оксида гафния в производстве элементов электронной компонентной базы //Информатика, телекоммуникации и управление. – 2015. – №. 4 (224). – С. 51-58.
8. Одинокое В. В. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ //Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1. – №. 10. – С. 260-266.



9. Дрозд А. В. Молекулярное наслаивание, опыт применения в микроканальных пластинах //Молодой ученый. – 2016. – №. 7. – С. 230-235.
10. Yan B., Liu S., Heng Y. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates //Nanoscale Research Letters. – 2015. – Т. 10. – С. 1-11
11. R. A. Alberty, R. J. Silbey, Physical Chemistry, 2nd ed, John Wiley & Sons, New York 1997, p. 607.
12. Королев Б. И. и др. Основы вакуумной техники. – 1975.
13. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended lifetime MCP-PMTs: Characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates, in a sealed photomultiplier tube //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – Т. 732. – С. 388-391.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОМПОЗИТА ZnO-CuO В ПРОЦЕССЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО КРАСИТЕЛЯ.**

Бронников П.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина),*

<sup>2</sup>*АО "НИТИ "Авангард", Санкт-Петербург*

**Аннотация:** Качество воды необходимо для нормального функционирования флоры и фауны на Земле, но потребности человека привели к огромному разнообразию загрязнителей: тяжелые металлы, пестициды, органические соединения, бактерии, вирусы и прочие. Среди передовых методов разложения загрязнителей наиболее широко используется гетерогенный фотокатализ – метод разложения и удаления вредных веществ из воды и воздуха. В работе представлены результаты по использованию композита ZnO-CuO для разложения органических красителей.

*Ключевые слова:* гетерогенный фотокатализ, оксид меди, оксид цинка, композит, органические красители

### **Введение**

В данной работе рассмотрен перспективный метод очистки воды от органических соединений, на примере разложения Родамина В. При этом использованы наработки в УНЛ “Наноматериалы” последних лет [1-6]. Основной акцент сделан на синтез композита на основе ZnO-CuO, обладающего уникальными свойствами, такими как высокая поверхностная активность, улучшенная фотокаталитическая активность и стабильность в процессе эксплуатации.

Интерес к композиту на основе оксида меди (CuO) и оксида цинка (ZnO) для применения в фотокатализе обусловлен рядом преимуществ благодаря комбинации свойств обоих материалов [7-9]. Одни из нескольких причин, почему такие материалы могут быть предпочтительны:

1. Улучшенная фотоактивность благодаря синергетическому эффекту между двумя компонентами.

2. Расширение спектра поглощения. Так как оксид цинка обладает способностью поглощать ультрафиолетовое (УФ) излучение, в то время как оксид меди (CuO) более активен в видимом диапазоне. Их комбинация позволяет расширить спектр поглощения до широкого диапазона длин волн света.

3. Улучшенная стабильность, что важно для долгосрочного использования

4. Увеличенная поверхность и активные центры.

5. Меньшее потребление материалов. Композиты сами по себе позволяют использовать меньшее количество материалов, сохраняя при этом или улучшая эффективность катализа.

Особый практический интерес представляет модель образования гетероперехода между материалами с разной кристаллической структурой, предложенная в работе [10], где показано, что в поликристаллическом исполнении между зёрнами ZnO и CuO могут образовываться эпитаксиальные контакты с когерентными границами.

Поэтому основной целью настоящей работы являлось экспериментальное развитие методов получения каталитических слоев на основе композитов ZnO-CuO и анализ эффективности разложения Родамина В при фотокатализе.

### Экспериментальные данные

Для синтеза композита был выбран золь-гель метод. Этот метод является универсальным и недорогим. Золь-гель технология включает процессы гидролиза и конденсации исходного материала в растворителе с образованием коллоидной системы наночастиц. Затем наночастицы можно собрать в различные наноструктуры, такие как тонкие пленки, пористые материалы и композиты [10-12].

Рецепт создания композита представлен ниже.

Смешиваем ацетат цинка ( $ZnC_2H_3O_4$ ) 0,1 М с 20 мл изопропилового спирта в соотношении 1:3. Пентагидрат сульфата меди (II) ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) 0,05 М смешиваем с 10 мл воды. Разбиваем растворы до гомогенного состояния на магнитной мешалке в течение 3 часов. После ставим в темное место на 2-е суток для образования гелеобразного осадка (рисунки 1-2).



Рис. 1. Полученный композит ZnO-CuO



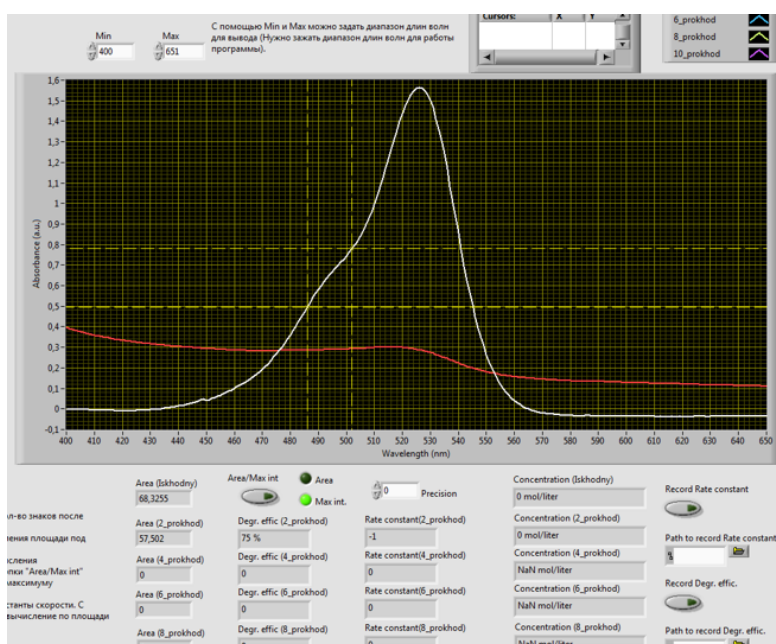
Рис. 2. Гомогенизация раствора

Далее сушим и прокаливаем полученный осадок. Сушим при 120 °С в течение 1 часа и прокаливаем при 500 °С в течение 5 часов. Полученный осадок смешиваем с раствором Родамина В и облучаем УФ светом в течение накопления суммарного интервала времени (10, 20, 30, 40 и 60 мин) После каждого промежутка времени проводили забор вещества и сканировали пробу на спектрофотометре. Полученный спектр анализировали по

специально созданной программе в среде LabVIEW. Результаты представлены на рисунке 3-4.

Из рисунка 3 видно, что уже через 10 мин нахождения композита в растворе с родамином происходит изменения спектра с уменьшением интенсивности от первоначального на 75%.

Результат, полученный через 20 мин свидетельствует, что реакция разложения родамина на безвредные составляющие начинает замедляться, а через 30 мин и в последующие итерациями уже выходит на насыщение, соответствующее снижению концентрации Родамина В более, чем на 80% (рисунок 4).



Рису. 3. Анализ спектров. Белая кривая- спектр Родамина В без композита. Спектр (красный) после добавления композита

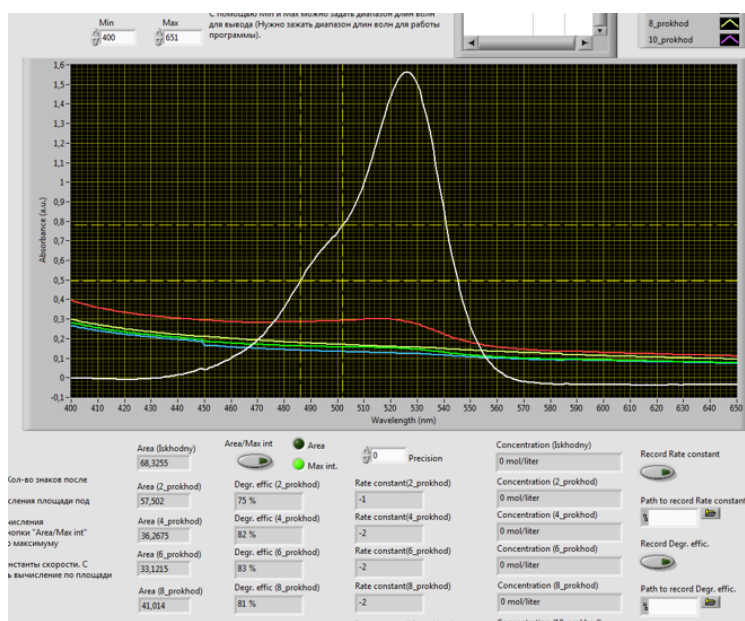


Рис. 4. Результаты анализа, полученные через 30, 40 и 60 мин.

### Заключение

В результате выполнения работы получены результаты, демонстрирующие перспективность применения композита ZnO-CuO для очистки воды от органических красителей. Последующие эксперименты для уменьшения концентрации красителя в воде возможно провести с изменением концентрации компонентов, входящих в состав композита или можно попробовать модернизировать данный состав новыми компонентами (например, частицами Ag [13-14]).

### Список литературы

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В. А. Мошникова, А. И. Максимова. - СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2022. - 220 с.
2. Пронин И.А., Донкова Б.В., Димитров Д.Ц и др., Взаимосвязь фотокаталитических и фотолюминесцентных свойств оксида цинка, легированного медью и марганцем // Физика и техника полупроводников. - 2014. - №48. - С. 868-874.
3. Пронин И.А., Канева Н.В., Божинова А.С., и др. Фотокаталитическое окисление фармацевтических препаратов на тонких наноструктурированных пленках оксида цинка// Кинетика и катализ. - 2014. - №55. - С. 176.
4. Yukhnovets O., Semenova A.A., Levkevich E.A. et.al. Zinc oxide hierarchical nanostructures for photocatalysis// Journal of Physics: Conference Series. 19th Russian Youth Conference on Physics of Semiconductors and Nanostructures, Opto- and Nanoelectronics. - 2017. 2018
5. Бобков А.А., Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитических свойств наноструктур оксида цинка, легированных магнием // Сборник научных трудов «Нанозифика и Наноматериалы». 2021. С. 34-42.
6. Maraeva E., Radaykin D. et al. Sorption analysis of composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science // *Chimica Techno Acta*. 2022. Vol. 9, №. 4. 20229422.
7. Saravanan, R., et al. "Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination." *Materials Science and Engineering: C* 33.1 (2013): 91-98.
8. Wei, Shouqiang, et al. "Fabrication of CuO/ZnO composite films with cathodic co-electrodeposition and their photocatalytic performance." *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 331.1-2 (2010): 112-116
9. О модели формирования поликристаллического гетероперехода n-ZnO/p-CuO. / Адилов Ш.Р., Кумеков М.Е., Кумеков С.Е., Теруков Е.И. //Физика и техника полупроводников 2013. Т. 47, №5. С. 642-643.
10. Золь-гель технология микро-и нанокомпозитов /Мошников В.А., Таиров Ю.М., Хамова Т.В., Шилова О.А. СПб: Лань, 2013. -304 с
11. Радайкин Д.Г., Бобков А.А. Синтез и исследование фотокатализатора ZnO, полученного золь-гель методом, на пористом субстрате // НАУЧНЫЙ АЛЬМАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ. 2022. С. 46-57.
12. Мошников В.А., Спивак ЮМ, Мараева Е.В. В кн. Физика и технология наноструктурированных функциональных материалов: Монография под ред. С.Д.Ханина, Ю.А.Кумзерова- СПб.:Изд/ Военной академии связи 2023.-12-44 с.
13. Радайкин Д.Г., Бобков А.А. и др. Исследование влияния внедренных наночастиц серебра на фотокаталитическую активность ZnO // НАУЧНЫЙ АЛЬМАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ. 2022. № 1-9. С. 12-20.
14. Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитической активности частиц оксида цинка, модифицированных наночастицами серебра // Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2022", секция "Химия". 2022. С. 292.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТРОЙНЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА

БУЗОВКИН С.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Работа посвящена разработке методов синтеза газочувствительных слоев станната цинка и феррита цинка, которые могут найти применение при создании адсорбционных полупроводниковых сенсоров для анализа низких концентраций токсичных газов. Были получены два различных смешанных оксида на основе наностержней оксида цинка. Показано, что образцы со станнатом цинка обладают высоким быстродействием и высоким откликом к парам изопропилового спирта.

*Ключевые слова:* полупроводниковые газовые датчики, станнат цинка, цинковый феррит, наностержни оксида цинка

В настоящее время об экологии начинает задумываться все больше и больше ученых, различные токсичные выбросы, которые могут выбрасываться как в результате работы каких-либо предприятий, так и в результате аварий или же утечек. Такие отходы могут нанести вред не только окружающему миру, но и человеческому организму, поэтому необходимо своевременно регистрировать даже незначительные концентрации токсичных газов. Чтобы регистрировать наличие газов в атмосфере можно использовать полупроводниковые сенсоры адсорбционного типа, которые становятся широко распространены в последнее время за счет своих малых размеров и высокого отклика.

Одним из наиболее популярных соединений для сенсорный слоев газочувствительных датчиков является оксид цинка, также известны способы улучшения его характеристик, одним из которых является создание тройных оксидных систем [1]. Этот метод позволяет увеличить отклик газовых сенсоров [2].

В ходе работы были получены два различных смешанных оксида на основе наностержней оксида цинка. Для формирования станната цинка был использован гидротермальный метод [3], а структура цинкового феррита формировалась методом осаждения [4, 5]. Обе структуры были созданы на предварительно синтезированных наностержнях оксида цинка, которые получались гидротермальным методом в автоклаве. Для создания наностержней раствор ацетата цинка с водой наносился на подложки и затем отжигался, далее подложка помещалась на дно автоклава, которые заполнялся раствором нитрата цинка и гексаметилентетрамина с водой, далее подложки отжигались [6].

При формировании станната цинка подложки помещались на дно автоклава, который заполнялся раствором станната калия и мочевины в 40% изопропиловом спирте [7], а при синтезе цинкового феррита подложки были помещены на полчаса в раствор сульфата железа в воде. После синтеза подложки отжигались при 500 °С.

Полученные структуры исследовались методом энергодиперсионной рентгеновской спектроскопии для определения однородности распределения элементов. Образцы феррита цинка и станната цинка показали однородное распределение.

Полученные тройные оксиды исследовались на газочувствительность к разным восстанавливающим газам: пары ацетона, пары этанола, пары изопропилового спирта при 250°С, концентрация ацетона – 1500 ppm, а концентрация двух других газов составила 1000 ppm. Образцы со станнатом цинка показали высокий отклик к парам изопропилового спирта. Сравнение быстродействия синтезированных газочувствительных слоев показало,

что для образцов с газочувствительным слоем феррита цинка времена восстановления и отклика значительно больше. Также для цинкового феррита были проведены исследования при различных концентрациях изопропилового спирта, была выявлена зависимость отклика от концентрации, близкая к линейной (в диапазоне 200 – 1000 ppm).

По итогам работы были разработаны методики синтеза газочувствительных слоев на основе наноструктур станната цинка и феррита цинка. Показано, что образцы со станнатом цинка обладают высоким быстродействием и высоким откликом к парам изопропилового спирта.

### Список литературы

1. Kaur, N., Singh, M., Comini, E. Materials engineering strategies to control metal oxides nanowires sensing properties //Advanced Materials Interfaces. – 2022. – Т. 9. – №. 12. – С. 2101629.
2. Nemufulwi M.I., Swart H.C., Shingange K., Mhlongo G.H. ZnO/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> heterostructure for conductometric acetone gas sensors //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2023. – Т. 377. – С. 133027.
3. Шомахов З.В., Налимова С.С., Кондратьев В.М., Максимов А.И., Рябко А.А., Мошников В.А., Молоканов О.А. Изменение энергетики поверхностных адсорбционных центров ZnO при легировании оловом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 8. – С. 58-63.
4. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Kondratev V.M., Moshnikov V.A., Karmokov A.M. Investigation of hierarchical gas-sensing ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanostructures // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Т. 17. № S1. – С. S416-S422.
5. Aubekero K., Punegova K.N., Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Sergeenko R., Kuznetsov A., Kondratev V.M., Kadinskaya S.A. Synthesis and study of gas sensitive ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-modified ZnO nanowires // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Т. 2227. С. 012014.
6. Рябко, А. А., Бобков, А. А., Налимова, С. С., Максимов, А. И., Левицкий, В. С., Мошников, В. А., Теруков, Е. И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации //Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – №. 5. – С. 758-764.
7. Шомахов, З. В., Налимова, С. С., Шурдумов, Б. З., Максимов, А. И., Мошников, В. А. Наноструктуры станната цинка для газовых сенсоров с высоким быстродействием //Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – №. 14. – С. 726.

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> С ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ В ГАЗОВЫХ СЕНСОРАХ

Буй К. Д.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В настоящее время газовые сенсоры представляют большой интерес для диагностики заболеваний и оценки эффективности лечения на основе анализа выдыхаемого воздуха. Композиты слоистого нитрида углерода с оксидами металлов являются одними из наиболее перспективных материалов для газовых сенсоров. В работе рассмотрены тенденции их применения в газовых сенсорах. Объяснен механизм взаимодействия g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с различными газами. Приведены примеры сенсоров на основе g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и оксидов металлов.

*Ключевые слова:* графитоподобный нитрид углерода, оксид металла, газовый сенсор, нанокompозит

Газовые сенсоры необходимы для обнаружения низких концентраций легковоспламеняющихся, взрывоопасных или токсичных газов и мониторинга загрязнения окружающей среды. Весьма перспективным направлением является диагностика заболеваний и оценка эффективности лечения на основе анализа выдыхаемого воздуха. К сенсорам предъявляются требования высокой чувствительности, быстродействия и хорошей селективности. Полупроводниковые адсорбционные сенсоры

просты, дешёвы и имеют большой выбор материалов чувствительных элементов [1]. Они действуют путём изменения сопротивления, когда на их поверхности происходят химические реакции с газами. Однако их широкое использование ограничено низкой селективностью и высокими рабочими температурами. Для решения этих проблем могут быть использованы различные чувствительные материалы, мультисенсорные системы [2] и режимы термомодуляции [3]. Облучение ультрафиолетовым или видимым светом используется вместо нагрева для снижения рабочей температуры [4,5]. Недавно исследовались газочувствительные свойства оксидов полупроводников *n*-типа [6,7], смешанных оксидов металлов [8-11] и двухмерных (2D) материалов [12].

Графитоподобный нитрид углерода (*g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) является широко используемым материалом в катализе благодаря его высокой химической стабильности и регулируемой морфологии. Его большая удельная поверхность и количество адсорбционных центров позволяют большему количеству газовых молекул участвовать в реакциях с целевыми газами. Его полупроводниковые свойства и способность к комплексообразованию обуславливают его большую эффективность по сравнению с графеном. Однако применение *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ограничено плотной структурой, низкой подвижностью носителей заряда, низкой электропроводностью и низкой чувствительностью.

Цель работы состоит в анализе основных тенденций применения графитоподобного нитрида углерода и его композитов с оксидами металлов в области газовой сенсорики.

Высокая адсорбционная способность и уникальная слоистая структура *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> способствуют его высокой чувствительности, которая во многом зависит от типа электрической проводимости. Предполагается, что самопротонирование нанолитов *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> объясняет механизм чувствительности. Электропроводность *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> во многом зависит от наличия на ее поверхности функциональных групп. Обработка волокон *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> в H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> способствует протонированию и обеспечивает дырочную проводимость. При высокотемпературном отжиге остаточные группы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> разлагаются на SO<sub>3</sub>, в результате чего происходит окисление волокна *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с образованием кислородсодержащих групп, таких как C=O и O=C-OH, которые обладают электронно-акцепторными свойствами [13].

Нитриды углерода содержат аминогруппы, которые притягивают молекулы кислорода. Когда молекулы NO<sub>2</sub> взаимодействуют с аминогруппами в *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, они захватывают больше электронов из-за более высокой электроотрицательности по сравнению с атомами углерода. Этот процесс переноса заряда от атома N к атому *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> на атом NO<sub>2</sub> снижает сопротивление *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. NO<sub>2</sub> может реагировать с водяным паром в воздухе, чтобы сформировать HNO<sub>3</sub>, который может протонировать волокна *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, тем самым уменьшая сопротивление [14].

Газовые сенсоры на основе *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> отделяются в зависимости от процесса окисления или восстановления на поверхности этого материала. В случае с восстанавливающим газом *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> доказал свою способность обнаруживать токсичные газы, промышленные и бытовые выбросы и другие газы [15]. В случае окисляющих газов *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> был изучен и доказал свою применимость к обнаружению газов NO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Однако использование газовых сенсоров на основе чистого *g*-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> весьма ограничено. Для улучшения его применимости в газовых сенсорах используются такие методы, как изменение морфологии, легирование и формирование гетероструктуры. Это приводит к увеличению площади поверхности, концентрации носителей заряда и минимизации рекомбинации электронов и дырок.

Добавление углерода в  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  повышает его чувствительность к  $\text{NO}_2$ , благодаря модификации электронной структуры  $\text{C}/g\text{-C}_3\text{N}_4$  и улучшения движения электронов. Чувствительность газа  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  с добавлением 10% углерода в 3 раза выше, чем исходного  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . Были разработаны газовые сенсоры на основе соединений  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и оксидов металлов, такие как нанокompозиты  $\text{ZnO}/r\text{GO}/g\text{-C}_3\text{N}_4$  для обнаружения этанола. Улучшение чувствительности обусловлено главным образом сочетанием эффектов малого размера  $\text{ZnO}$ , отличной электропроводности  $r\text{GO}$ ,  $p\text{-}n$  гетерообразованием перехода между  $\text{ZnO}$  и  $r\text{GO}$  и улучшением генерации электронов и дырок [16].

Эффективный сенсор ацетона был синтезирован с использованием нанокompозитов  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{WO}_3$ , которые сочетали в себе ультратонкие наноллисты, подходящую кристаллическую фазу и пористую поверхность  $\text{WO}_3$  [17]. Отклик сенсора на  $\text{C}_2\text{H}_6$  значительно улучшилась после декорирования  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  на структуру  $\text{ZnO}$ . К факторам, определяющим улучшение сенсорных свойств, относятся увеличение конкретной поверхностной площади и формирование  $n\text{-}n$ -гетероперехода. Поступление дополнительных электронов от  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  приводит к более существенному сокращению области обеднённого заряда.

Несколько исследований подтвердили эффективность фотоактивации чувствительности газов при комнатной температуре в нанокompозитах «металлооксид/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ » путём отделения фотогенерируемых зарядных носителей. Сенсоры, основанные на  $\text{ZnO}/g\text{-C}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2\text{-C}/g\text{-C}_3\text{N}_4$  и  $2\text{D}/2\text{D ZnO}/g\text{-C}_3\text{N}_4$  продемонстрировали эффективность в обнаружении этанола при ультрафиолетовом освещении и воздействии видимого света.

$g\text{-C}_3\text{N}_4$  является перспективным материалом для газовых сенсоров благодаря его высокой удельной площади поверхности, каталитическим свойствам и мезопористости. При создании нанокompозитов он улучшает чувствительность, обеспечивая активные центры для взаимодействия с газами и снижая рабочую температуру. Управление мезопористостью обеспечивает диффузию молекул газа, повышая эффективность сенсора. Формирование гетероперехода между  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  и оксидами металлов изменяет свойства переноса заряда. Наличие оксидов металлов в различных фазах усиливает сенсорный отклик путём передачи электронов между гомо- и гетеропереходами. Композит из  $2\text{D}-2\text{D}$  материалов (графена и  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) может обеспечить большую площадь поверхности и более высокую электропроводимость для эффективного взаимодействия с газами.

### Список литературы

1. Рябко А. А. и др. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 758.
2. Rabchinskii M. K. и др. Toward On-Chip Multisensor Arrays for Selective Methanol and Ethanol Detection at Room Temperature: Capitalizing the Graphene Carbonylation // ACS Applied Materials & Interfaces. 2023. Т. 15. № 23. С. 28370–28386.
3. Shaposhnik A. V. и др. Semiconductor metal oxide sensor for hydrogen sulphide operating under non-stationary temperature conditions // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases. 2021. Т. 23. № 4. С. 637–643.
4. Рябко А. А. и др. Сенсбилизация наностержней  $\text{ZnO}$  коллоидными квантовыми точками  $\text{AgInS}_2$  для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 6. С. 845.
5. Nalimova S. S. и др. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1697. № 1. С. 012128.
6. Nalimova S.S. и др. Study of sensor properties of zinc oxide based nanostructures // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1658. С. 012033.
7. Рябко А.А. и др. Архитектоника покрытий из наностержней оксида цинка для адсорбционных газовых сенсоров // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 10. С. 1494-1502.



8. Шомахов З.В. и др. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании газочувствительных структур смешанных оксидов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2024. Т. 29. № 1. С. 7-18.
9. Шомахов З.В. и др. Улучшение сенсорных характеристик бинарных и тройных оксидных наносистем // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2023. № 15. С. 879-887.
10. Punegova K.N. и др. Zinc stannate nanostructures for low-temperature gas sensors with improved response and performance // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 2023. Т. 16. № S1.2. С. 229-235.
11. Шомахов З.В. и др. Наноструктуры станната цинка для газовых сенсоров с высоким быстродействием // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2022. № 14. С. 726-735.
12. Simonenko E. P. и др. Application of Titanium Carbide MXenes in Chemiresistive Gas Sensors // Nanomaterials. 2023. Т. 13. № 5. С. 850.
13. Li S. и др. Orientation controlled preparation of nanoporous carbon nitride fibers and related composite for gas sensing under ambient conditions // Nano Research. 2017. Т. 10. № 5. С. 1710–1719.
14. Wang D. и др. Novel C-rich carbon nitride for room temperature NO<sub>2</sub> gas sensors // RSC Adv. 2014. Т. 4. № 35. С. 18003–18006.
15. Cao J. и др. Solid-State Method Synthesis of SnO<sub>2</sub>-Decorated g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanocomposites with Enhanced Gas-Sensing Property to Ethanol // Materials. 2017. Т. 10. № 6. С. 604.
16. Meng F. и др. ZnO-Reduced Graphene Oxide Composites Sensitized with Graphitic Carbon Nitride Nanosheets for Ethanol Sensing // ACS Applied Nano Materials. 2019. Т. 2. № 5. С. 2734–2742.
17. Wang D. и др. Ultrathin WO<sub>3</sub> nanosheets modified by g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for highly efficient acetone vapor detection // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Т. 282. С. 961–971.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА В ТРАНЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

БУХБИНДЕР Н.В., СЕМЕНОВ А.С., СЕМЁНОВ М.Д., КРИВОШЕЕВА А.Н.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная работа рассматривает четыре структуры транзисторов, выполненных на карбиде кремния политипа 4H. Транзисторы были спроектированы в Sentaurus TCAD. Проведено исследование влияния конструктивных параметров на статические параметры транзисторов.

*Ключевые слова:* карбид кремния, DMOSFET, SJ-MOSFET, MESFET, ВJT, Synopsys SENTAURUS TCAD

### Введение

Полупроводниковые приборы на карбиде кремния 4H политипа представляют интерес в силовой электронике уже долгое время. Одними из отличительных свойств 4H-SiC являются: большая ширина запрещенной зоны, высокая теплопроводность и радиационная стойкость, которые наиболее востребованы в данной сфере.

### Моделирование структур

В данной работе рассматриваются следующие транзисторные структуры: DMOSFET, SJ-MOSFET [1], ВJT, MESFET. Исследовалось влияние концентрации легирующих примесей в активных областях MESFET, буферного слоя в ВJT и вертикальных глубоких канавок р типа проводимости в MOSFET на статические характеристики транзисторов. Особое внимание уделялось пороговому напряжению, току насыщения и пробивному напряжению.

Работа выполнена с использованием специализированного ПО – Synopsys Sentaurus TCAD, которое позволяет проводить моделирование полупроводниковых структур. [2] При расчете можно учитывать различные модели поведения носителей заряда (модель подвижности, рекомбинации, ударной ионизации, инжекции), физические параметры материала, а также модели распределения электрического поля и потенциала.

Структуры транзисторов, изображенные на рисунке 1 спроектированы в модуле Structure Editor. Созданные конструкции представляют собой упрощенный вариант реальной модели транзистора: толщина подложки не соответствует реальному размеру, так как основные процессы переноса заряда и образования потенциальных барьеров будут происходить в активных областях транзистора, соответственно для данного исследования подложка транзистора не является основополагающим фактором.

В результате эксперимента было установлено, что концентрация легирующей примеси в канале MESFET транзистора  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в р подложке позволяет достичь значения 137 В пробивного напряжения (рис.3). При этом пороговое напряжение транзистора составило -23 В (рис. 2).

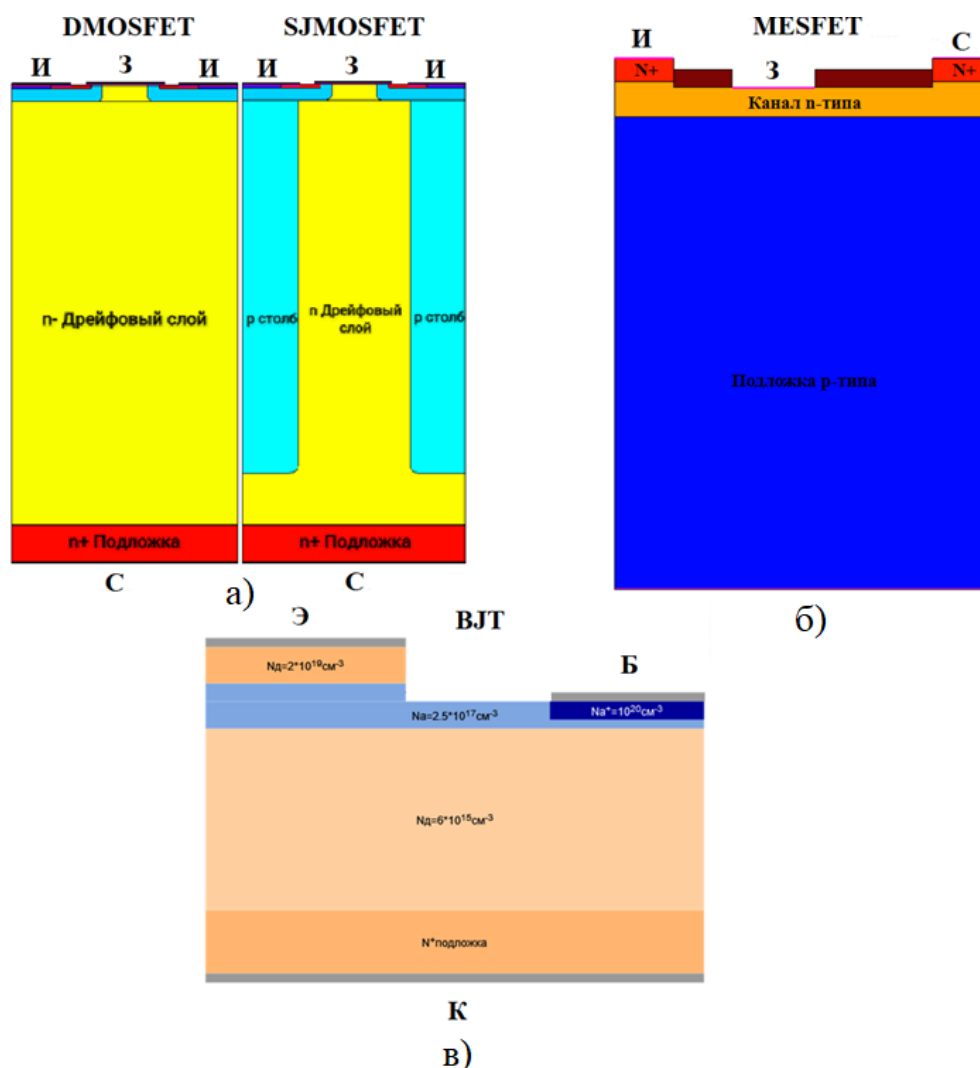


Рис. 1. Структуры транзисторов: а) DMOSFET и SJMOSFET; б) MESFET; в) ВJT

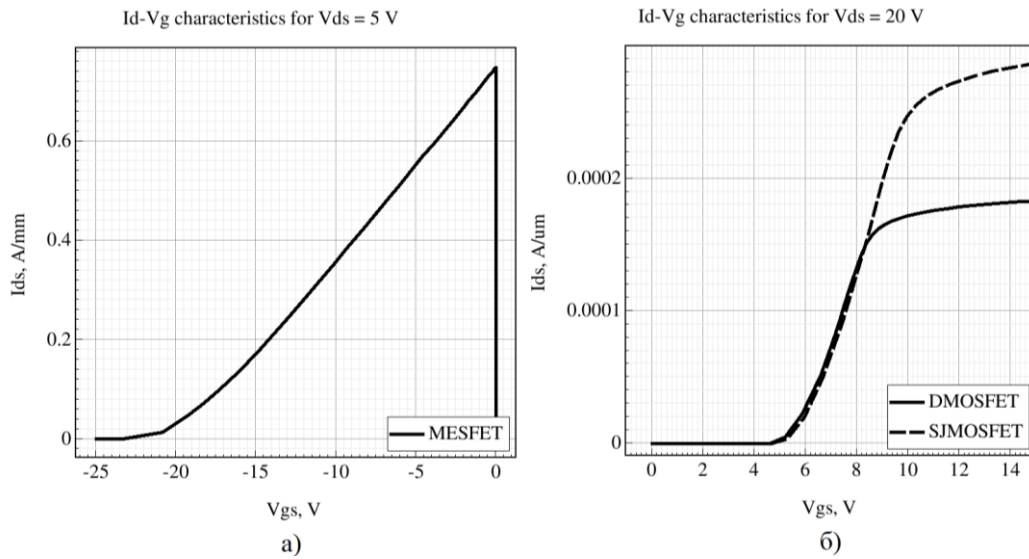


Рис. 2. Проходные характеристики а) MESFET; б) MOSFET

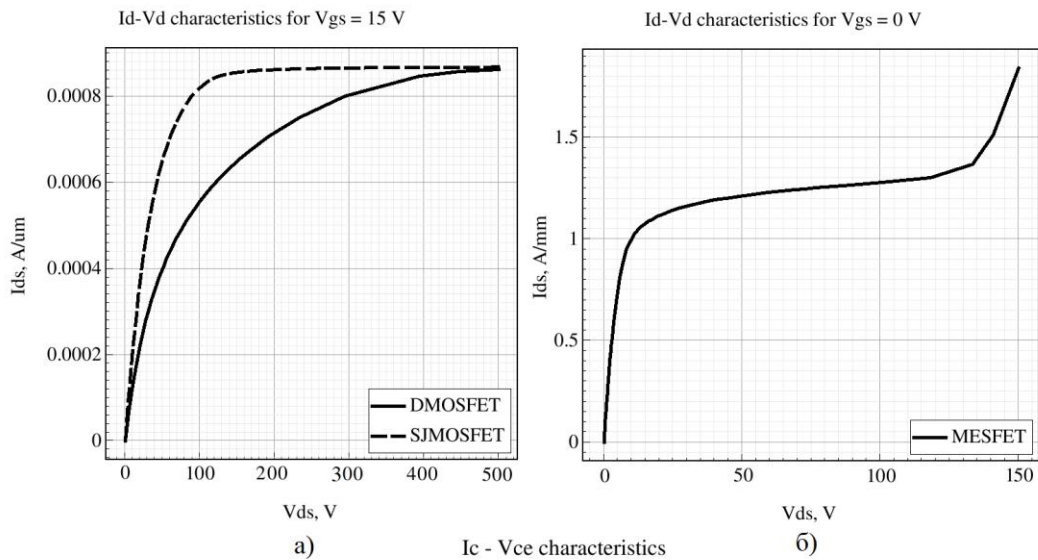


Рис. 3. Выходные характеристики а) MOSFET; б) MESFET; в) BJT

Концепция суперперехода в MOSFET транзисторах на основе карбида кремния показала увеличение пробивного напряжения с 2500 до 6000 В, уменьшение сопротивления канала в открытом состоянии с 81 до 53 мОм·см<sup>2</sup>, а также ускоренное быстроедействие и меньшие потери на переключение индуктивной нагрузки.

Добавление буферного слоя в биполярный транзистор с концентрацией азота  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> в коллекторную область, позволило увеличить значение коэффициента усиления по току с 67 до 80 у.е., что на 20% выше, чем у структуры без буферного слоя. Ток коллектора увеличился на 34.5% (рис. 3), а ток утечки уменьшился на 14%.

### **Заключение**

Таким образом, в данной работе были исследованы статические характеристики силовых транзисторов на карбиде кремния 4Н политипа. В результате моделирования было показано влияние конструктивных и технологических параметров на значение пробивного напряжения для MESFET и MOSFET структур, сопротивление открытого канала и коэффициента усиления по току для ВЛТ. Увеличение пробивного напряжения транзисторов позволяет им работать с более высокими напряжениями, например, для коммутации различных типов нагрузок при ключевом режиме работы MOSFET или при работе MESFET в усилительных схемах с большим напряжением питания. Повышение коэффициента усиления по току биполярного транзистора снижает затраты на управление.

### **Список литературы**

1. Adenekan O. A. Design and Scaling of Lateral Super-junction Multi-gate MOSFET by 3-D TCAD Simulations: дис. Swansea University, 2019.
2. Device S. User Guide, Synopsys Inc. ver // G-2012.06, June. 2012.

## **ВЛИЯНИЕ ВАЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА $2+ \rightarrow 3+$ В НАНОПЛЕНКАХ ИТТЕРБИЯ НА ДЛИНУ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ**

Висицкий Д.В.<sup>1</sup>, Ремеле В.Е.<sup>1,2</sup>, Кузьмин М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф.Иоффе

**Аннотация.** Данная работа посвящена определению длины свободного пробега электронов в пленках иттербия. Для определения длины свободного пробега электронов были использованы электронная Оже – спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия. Было показано, что длина свободного пробега в двухвалентном иттербии является аномально высокой, а при переходе в трехвалентное состояние ее величина очень близка к средним значениям характерным для большинства металлов. Это обусловлено переходом  $4f$  – электрона на  $5d$  – уровень в валентной зоне и увеличением вероятности неупругих потерь в пленках  $Yb^{3+}$ .

*Ключевые слова:* электронная спектроскопия, электронная структура, длина свободного пробега, валентность, иттербий

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-22-00052*

Электронная Оже – спектроскопия (ЭОС) и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) являются очень важными методами в исследовании поверхностей и тонких плёнок. В связи с важностью этих методов исследования, естественным образом

встает вопрос об определении основных фундаментальных параметров, используемых в этих методах. Одним из таких параметров является длина свободного пробега электронов  $\lambda$ , которая задает разрешающую способность метода по глубине.

Ее значение можно оценить с помощью «универсальной» кривой – зависимости длины свободного пробега электрона от его энергии  $\lambda(E)$ . Эта зависимость позволяет определить длину свободного пробега многих материалов, однако каждый материал так или иначе отклоняется от нее и иногда эти отклонения могут быть очень велики – вплоть до 200% [1]. По этой причине далеко не всегда корректно применять универсальную кривую не только для определения точного значения длины свободного пробега, но даже для ее оценки.

По этой причине становятся актуальными работы, в которых производится точное определение длин свободного пробега электронов определенных материалов. На данный момент существует большое количество таких работ [2],[3], однако они все еще не покрывают все материалы, необходимые исследователям. Так, например, ряд редкоземельных элементов представлен в литературе относительно плохо – в случае с некоторыми представителями РЗМ данных в литературе практически нет. Одним из таких примеров является иттербий – авторам настоящего сообщения известна лишь одна работа, в которой экспериментально определяется длина свободного пробега в иттербии [4].

В связи с этим возникает вопрос об определении длины свободного пробега в иттербии, что и является целью данной работы. Такой выбор объекта исследований был дополнительно обусловлен еще и тем, что этот редкоземельный элемент может легко изменять свою валентность – она может варьироваться от II до III[5]. В свою очередь, изменение валентности порождает значительные перестройки в электронной структуре, о чем будет более подробно рассказано ниже.

Как правило, длину свободного пробега электронов определяют с помощью методов спектроскопии при помощи построения зависимости интенсивности фиксированного пика от толщины плёнки  $I(\theta)$ , адсорбированной на подложку. Полученная зависимость аппроксимируется функциями вида  $\exp(-\frac{\theta}{\lambda})$ . Варьируя величину  $\lambda$ , можно определить длину свободного пробега электронов в материале – она будет равна значению, которое делает отклонение теоретических и экспериментальных зависимостей наименьшим.

Именно так определялась длина свободного пробега иттербия и в этой работе. Все эксперименты, результаты которых описаны ниже, проводились в сверхвысоковакуумных установках с базовым давлением  $\leq 1 \cdot 10^{-10}$  Торр. Иттербий наносился на подложки Si(111)(7×7) (*n*-тип,  $\rho \approx 1-7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ ). Температура кремния во время осаждения была равной 290-300К. При заданных условиях структуры Yb-Si(111) формируются таким образом, что они имеют низкую шероховатость и химически резкую границу раздела [6]. Все это снижает погрешность в определении  $\lambda$ . Для напыления использовались испарители, нагреваемые с помощью танталовой нити. Скорость осаждения иттербия составляла один монослой (ML) в минуту. В качестве методов спектроскопии использовались РФЭС и ЭОС.

Типичный спектр, полученный для системы Yb-Si(111) с помощью ЭОС, показан на рисунке 1а (нижняя кривая). Его форма свидетельствует, что иттербий в этой системе имеет валентность, равную 2+. По результатам ЭОС также была построена зависимость интенсивности Оже-линии кремниевой подложки от толщины экранирующей ее пленки

иттербия. Эта зависимость изображена на рисунке 2а. Из ее анализа следует, что значение  $\lambda$  для пленок двухвалентного иттербия равно 15,44 Å.

Полученное значение является аномальным – при энергии электронов 92eV длина свободного пробега по универсальной кривой составляет порядка 5-6 Å. Таким образом, отклонение составляет почти 200%, что в свою очередь хорошо согласуется с результатами прошлых исследований [7].

Полученный результат может быть объяснен следующими причинами: вклад 4f электронов в неупругие рассеяния вероятнее всего крайне мал, к тому же Yb является двухвалентным металлом, и его валентная зона образована лишь s – электронами, эти два факта вероятно и обуславливают большое значение  $\lambda$ . В пользу этого говорит еще и тот факт, что величины  $\lambda$  сильно превышающие средние встречаются и у других s-металлов. Так, например, согласно расчетам, длина свободного пробега рубидия равна 11.1 ангстрем, а цезия 12.6 [8].

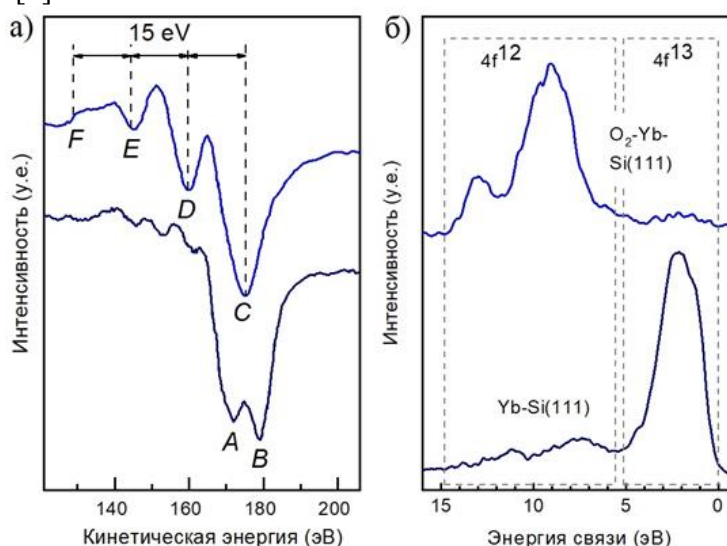


Рис. 1. Экспериментальные спектры а – ЭОС, б – РФЭС

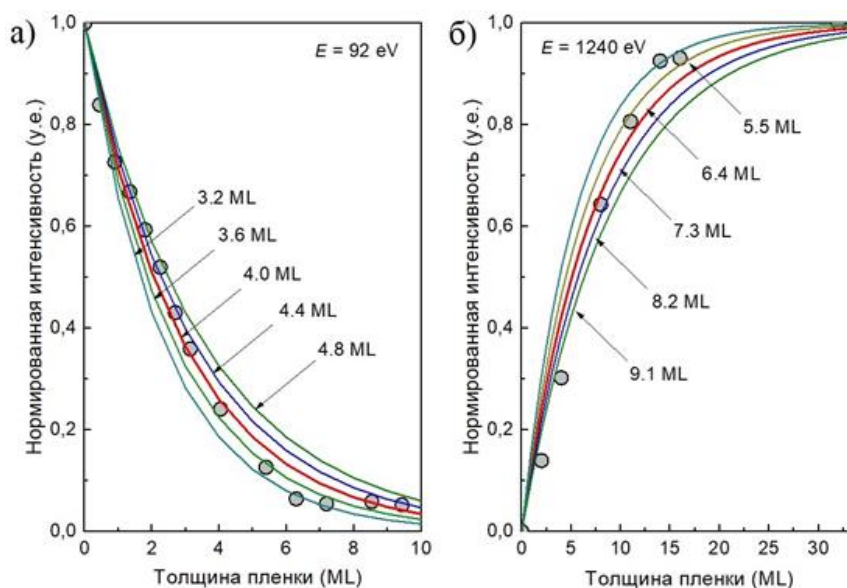


Рис. 2. Определение длины свободного пробега а – Yb(II), б – Yb(III)

Поскольку иттербий, как уже упоминалось ранее, может переходить в трехвалентное состояние, возникает вопрос о том, как такой переход отразится (и отразится ли вообще) на длине свободного пробега.

В этой работе трехвалентный иттербий получался с помощью адсорбции слоя молекул  $O_2$  (доза – 100 L), которые индуцировали валентный переход  $Yb^{2+} \rightarrow Yb^{3+}$ . Указанная трансформация была подтверждена по изменению формы линии Оже-спектра иттербия (рис. 1а). Этот вывод также полностью согласуется с данными РФЭС (рис. 1б), так как форма линии 4f-спектра иттербия является надежным индикатором валентного состояния атомов Yb [9].

При помощи РФЭС также была построена зависимость интенсивности сигнала пленки трехвалентного иттербия от ее толщины для структур  $O_2$ -Yb-Si(111). Эта зависимость представлена на рисунке 2б. Аналогично методу, используемому в ЭОС, была определена  $\lambda$  для РФЭС - она равна 25,3А. Эта величина уже с большой степенью точности соответствует универсальной кривой. Таким образом, длина свободного пробега для трехвалентного иттербия является типичной для данных энергий электронов, в отличие от случая двухвалентного иттербия, в котором длина свободного пробега является аномально высокой при заданных энергиях.

Полученное различие между  $Yb^{2+}$  и  $Yb^{3+}$  можно объяснить перестройкой электронной структуры, которая происходит вследствие перехода  $Yb^{2+} \rightarrow Yb^{3+}$ . В трехвалентном иттербии появляются 5d – состояния, которые гибридизуются с 6s – электронами валентной зоны  $Yb^{3+}$ . Вероятно, эта перестройка повышает сечение возбуждения плазменных колебаний, которые в свою очередь, являются одним из основных причин потери энергии при неупругих рассеяниях. Наличие же в структуре указанных колебаний иллюстрирует ЭОС – спектр, представленный на рисунке 1а – пики F, E и D обусловлены плазмонными потерями. Стоит отметить и то, что рост потерь на плазмонах из-за перехода иттербия в трехвалентное состояние наблюдался и ранее в работе [10].

### Список литературы

1. M.P. Seah, W.A. Dench, Surf. Interf. Anal., **1** (1), 2 (1979)
2. D.-N. Le, H.T. Nguyen-Truong, J. Phys. Chem. C, **125** (34), 18946 (2021)
3. J.M. Gong, K. Tőkési, X. Liu, B. Da, H. Yoshikawa, S. Tanuma, Z.J. Ding, Results in Physics, **51**, 106609 (2023).
4. F. Gerken, J. Barth, R. Kammerer, L.I. Johanson, A. Flödström, Surf. Sci., **117**, 468 (1982)
5. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. «Металловедение редкоземельных металлов» АН СССР, 1962
6. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, ЖТФ, **90** (8), 1359 (2020)
7. F. Gerken, J. Barth, R. Kammerer, L.I. Johanson, A. Flödström, Surf. Sci., **117**, 468 (1982).
8. C.J. Powell, A. Jablonski, NIST Electron Inelastic-Mean-Free-Path Database, Version 1.2, SRD 71, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2010).
9. Д.В. Бутурович, М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, Письма в ЖТФ, **38** (21), 22 (2012).
10. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, ФТТ, **53** (3), 569 (2011).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ НА 150 ММ КРЕМНИЕВЫХ ДИСКАХ

ГАВРУС И.В., СТЕПЧЕНКО А.Д., ЯКОВЕНКО А.А.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Новочеркасск, Россия;*

**Аннотация.** Для использования метода термомиграции в электронике необходимо обеспечить в нагревательном устройстве однородное поле градиента температуры. В работе рассмотрено влияние геометрии нагревательного устройства на конфигурацию поля градиента температуры в кремниевом диске диаметром 150 мм при проведении процесса термомиграции жидких зон на основе алюминия. Проведена оценка неоднородностей поля температурного градиента, вызванных плоским прямоугольным нагревателем и предложена конструкция нагревательного устройства, подобного кремниевому диску. Экспериментально показаны преимущества предложенной геометрии нагревательного устройства.

*Ключевые слова:* термомиграция, нагревательное устройство, градиент температуры

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Южно-Российскому государственному политехническому университету (НПИ) имени М.И. Платова по теме FENN-2023-0005.

### **Введение**

В области технологии полупроводниковых приборов известен метод термомиграции (ТМ), использующийся для создания сквозных легированных каналов в кремниевых дисках [1]. По сравнению с процессом диффузии метод ТМ обладает низкой температурой процесса, высокой скоростью и возможностью однородного легирования каналов.

При использовании дисков большого диаметра существующие нагревательные устройства (НУ), применяемые для ТМ, не всегда могут обеспечить требуемую однородность поля температурного градиента из-за различных факторов, таких как неоднородность температурного поля в самом нагревательном элементе и краевые эффекты, вызванные конечными размерами диска и нагревателя. Так, в работе [2] с помощью компьютерного моделирования были выявлены локальные неоднородности поля температурного градиента в пластине кремния диаметром 100 мм и найдены условия создания однородного поля градиента температуры для применения метода ТМ в полупроводниковой промышленности.

Настоящая работа посвящена развитию идей, предложенных в работе [2] и адаптации конструкции НУ для реализации процесса ТМ на пластинах диаметром 150 мм. Оценка однородности поля градиента температуры на обрабатываемом диске выполнялась компьютерным моделированием и экспериментально. Исследование образцов со сквозными каналами проводилось с помощью металлографического анализа.

### **Компьютерное моделирование**

Моделирование распределения температурного поля выполнялось в следующей системе: плоский резистивный нагреватель – кремниевый диск – кассета – фронтальный экран, с применением программного обеспечения для инженерного моделирования и численного анализа ANSYS.

Моделируемый плоский графитовый нагреватель имел размеры 195x175x5 мм с шириной полос – 10 мм и зазором между ними – 1 мм. Кремниевый диск диаметром 150 мм расположен параллельно поверхности нагревателя и закреплен в отверстии кассеты толщиной 5 мм. Конструкция предусматривала изменение характерных расстояний  $H$ ,  $s$  и  $d$  (рис. 1) в интервалах 2–11 мм, 0–5 мм и 0–20 мм, соответственно. В ходе моделирования



было обнаружено, что в стационарном режиме диск кремния нагрет неравномерно, на нем проявляются периодические неоднородности, связанные со структурой нагревательного элемента и монотонные неоднородности, вызванные тепловым излучением с боковой поверхности диска и приводящие к отводу тепла от его периферийной части, аналогично работе [2]. Существовало оптимальное значение заглабления кремниевого диска, соответствующее установлению теплового баланса между торцом диска и поверхностью стенки отверстия в кассете, необходимое для предотвращения тепловых утечек с периферии диска. Вместе с тем была обнаружена неоднородность, связанная с отсутствием подобия квадратной кассеты дисковой форме (рис. 2). Эта неоднородность проявляется в различном градиенте температуры на кассете, передаваемом на кремниевый диск.

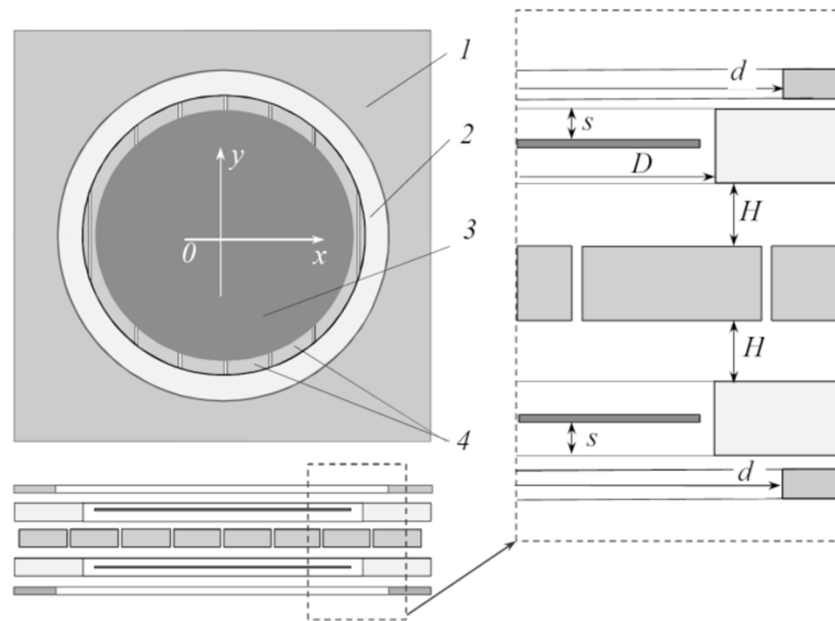


Рис.1. Схема моделируемого нагревательного устройства:  
1 – фронтальный экран; 2 – кассета; 3 – кремниевый диск; 4 – нагревательный элемент

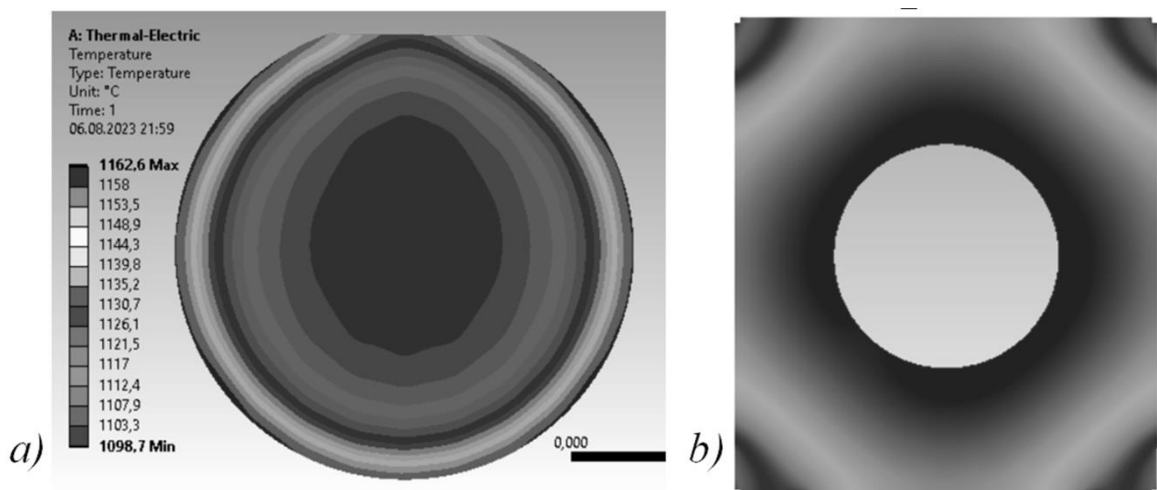
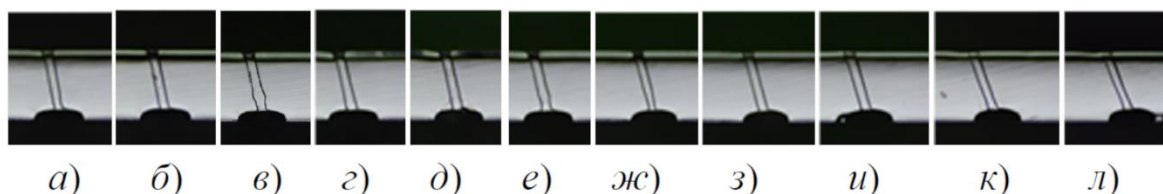


Рис.2. Неоднородность распределения температуры, связанная с отсутствием подобия дисковой формы:  
а) на поверхности диска; б) на кассете

### Экспериментальные исследования

Для проверки данных моделирования были проведены процессы ТМ в НУ, аналогичном приведенному в модели. НУ устанавливали в вакуумной камере, созданной на базе установки РЕДМЕТ-8 оснащенной двухступенчатой системой откачки воздуха (остаточное давление не более  $2 \cdot 10^{-2}$  Па), системой водоохлаждения (расход воды ~700 л/час), трехфазной системой регулируемого электропитания (мощностью не менее 30 кВт) с использованием мостовой схемы выпрямления трехфазного напряжения (схема Ларионова Л.Н.), системой управления и контроля температурно-временного режима процесса с точностью поддержания температуры 1 К. Контроль прохождения каналов в диске выполнялся металлографически в поперечном сечении.



*Рис.3. Поперечные сечения эпитаксиальных каналов на различных расстояниях от центра диска (мм): 18 (а), 20 (б), 22 (в), 24 (г), 26 (д), 28 (е), 30 (ж), 32 (з), 34 (и), 36 (к), 38 (л). Угол отклонения каналов от нормали монотонно изменяется от 8 до 20 градусов. Зоны двигались снизу-вверх. Толщина диска кремния 500 мкм*

Сечение кремниевого диска диаметром 150 мм было выполнено под  $45^\circ$  относительно оси  $x$ , вдоль направления, в котором, согласно моделированию, температурное поле искажено (рис. 3). Видно, что траектории движения зон отклоняются от нормали к центру диска, причем отклонение тем больше, чем дальше от центра на стартовой поверхности располагается линейная зона. Это свидетельствует о наличии неоднородностей градиента температуры, обусловленных утечками тепла на периферии диска, что соответствует данным, приведенным в настоящей работе.

### Разработка НУ для ТМ на дисках диаметром 150 мм

Предложена конструкция НУ, обладающая цилиндрической симметрией, позволяющая исключить обнаруженную неоднородность поля. Конструкция имеет корпус и кассеты в форме дисков и цилиндров, подобные форме кремниевых дисков. НУ включает плоский графитовый нагреватель, зафиксированный между двумя молибденовыми кольцами, стянутыми ободом, и изолированный от них алундовой керамикой (рис. 4).

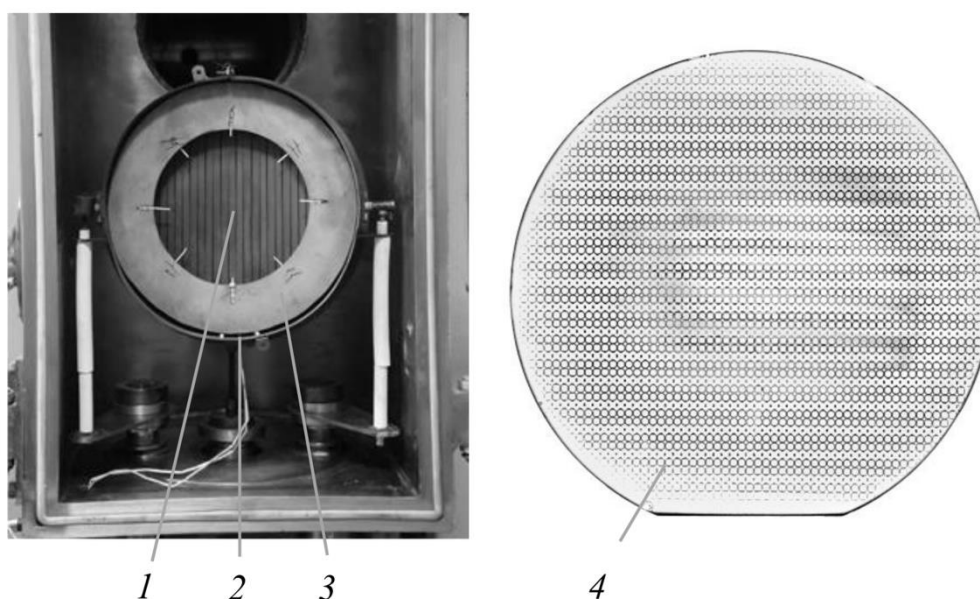


Рис.4. НУ для термомиграции на дисках 150 мм: 1 – нагревательный элемент, 2 – корпус, 3 – кассета, 4 – кремниевый диск после ТМ с финишной стороны (каналы отображены более темным оттенком)

Эксперименты по проведению процесса ТМ на кремниевом диске диаметром 150 мм показали, что жидкие зоны вышли на финишную поверхность без отклонений траектории, образовав каналы, нормальные поверхности диска (Рис. 4).

#### **Заключение**

При помощи математического моделирования проведена оценка неоднородностей поля температурного градиента, вызванных плоским прямоугольным НУ. Моделируемая система с нагревателем показала, что конструктивная возможность регулирования относительного положения элементов системы позволяла найти оптимальное положение кремниевого диска, соответствующее установлению теплового баланса и минимизации обнаруженных неоднородностей. Также была обнаружена систематическая неоднородность, связанная с отсутствием подобия квадратной кассеты дисковой форме. Исключение этой неоднородности возможно путем перехода к конструкции, обеспечивающей подобие форме кремниевых дисков. Предложена конструкция НУ, позволяющая проводить процесс ТМ на дисках диаметром 150 мм. Экспериментально реализовано и апробировано НУ, в котором реализован предложенный вариант устранения неоднородностей температурного поля. На кремниевом диске диаметром 150 мм была получена система сквозных замкнутых эпитаксиальных каналов, мигрировавших без отклонений траектории движения, нормально поверхности диска.

#### **Список литературы:**

1. В.Н. Лозовский, Л.С. Луин, В.П. Попов, Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов (Металлургия, М., 1987).
2. Б.М. Середин, В.П. Попов, А.Н. Заиченко, А.В. Малибашев, И.В. Гаврус, А.А. Минцев, А.А. Скиданов, ФТТ, **65**(12), 2051 (2023). DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56720.4914k

## ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТОВ И ПОРИСТЫХ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ИК ФУРЬЕ- СПЕКТРОСКОПИИ

ГАГАРИНА А.Ю., ШУМИЛО М.В., БЕЗВЕРХНИЙ В.П.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

***Аннотация.** Были получены и исследованы методами ИК Фурье-спектроскопии композиты на основе нанокристаллов перовскитов состава CsPbI<sub>3</sub> и мезопористых частиц SiO<sub>2</sub>. Нанокристаллы перовскитов были получены методом горячей инъекции. Композиты были получены путем перемешивания порошка диоксида кремния и раствора перовскитов в атмосфере азота при комнатной температуре. По результатам работы обсуждается возможность стабилизации структуры перовскитов.*

*Ключевые слова:* перовскиты, композитные наноматериалы, ИК Фурье-спектроскопия

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022. <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>

Галоидные перовскиты привлекли огромное внимание исследователей как перспективные фотоэлектрические материалы с широким спектром применения в оптоэлектронной области [1-4]. Особый интерес галоидные перовскиты представляют как материалы светопоглощающих слоев в солнечных элементах (СЭ), так как их применение позволит увеличить эффективность СЭ до 20 % за короткий промежуток времени, а также существенно снизит стоимость за счет дешевизны изготовления.

Однако проблемой остается низкая эксплуатационная стабильность НК перовскитов под воздействием внешних факторов и миграция анионов в кристаллической решетке под облучением светом и в электрическом поле. Особенно остро эта проблема возникает в СЭ, в которых на границе активного и транспортного слоев протекают основополагающие энергетические процессы. Необходимы разработки подходов обработки межслоевой границы для снижения безызлучательной рекомбинации, а также предотвращения потери летучих компонентов из активного слоя [5].

Одним из способов стабилизации НК перовскитов является создание композитов и структур типа ядро-оболочка. Наиболее перспективным материалов для создания композитов является пористый диоксид кремния (SiO<sub>2</sub>). Главными преимуществами материала являются его доступность, а также возможность пространственного ограничения НК перовскитов в объеме пор, что позволяет частично предотвратить фазовый переход из фотоактивной фазы в неизлучающую [6].

В рамках данной работы были получены и исследованы методами ИК Фурье-спектроскопии композиты CsPbI<sub>3</sub>@SiO<sub>2</sub>.

Перовскитные нанокристаллы состава CsPbI<sub>3</sub> были получены методом горячей инъекции. Синтез прекурсоров осуществлялся одновременно. В первую трёхголовую колбу вводилось 0,124 г (0,27 ммоль) йодида свинца (PbI<sub>2</sub>), 1,5 мл олеинамина (ОА), 0,75 мл олеиновой кислоты (ОЛА) и 7,5 мл октадецена (ОДЕ), после чего смесь дегазировалась в течение 10 мин при температуре 100 °С. Затем смесь нагревалась до 130 °С для полного растворения PbI<sub>2</sub>.

Во вторую трехгорловую колбу вводилось 0,1015 г карбоната цезия ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ), 5 мл ODE, 0,5 мл ОА. Затем при непрерывном магнитном перемешивании смесь нагревалась до 170 °С в атмосфере инертного газа до полного растворения  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ .

Прекурсоры смешивались при молярном соотношении 1:1. Для этого при помощи стеклянного шприца через септум в газоотводной трубке в объем первой трехгорловой колбы было введено 0,27 мл олеата цезия. Через пять секунд после введения смесь охлаждалась в ледяной бане.

Затем полученный раствор распределялся по пробиркам Эппендорфа и центрифугировался в течение 10 мин при скорости 13000 об/мин, полученный осадок отделяли от надсадочной жидкости, растворяли в избытке н-гексана и повторно центрифугировали.

Степень очистки нанокристаллов перовскитов оценивалась визуально по яркости фотолюминесценции под воздействием ультрафиолетовой лампы.

Композиты  $\text{CsPbI}_3@\text{SiO}_2$  были получены путем перемешивания с использованием магнитной мешалки в атмосфере азота  $\text{CsPbI}_3$  и  $\text{SiO}_2$  в виде порошка (производитель ПОЛИСОРБ) в течение 15 мин.

ИК-спектры композитов  $\text{CsPbI}_3@\text{SiO}_2$  были исследованы на спектрометре марки «ИнфраЛЮМ ФТ-08».

По результатам работы обсуждается возможность стабилизации НК перовскитов частицами  $\text{SiO}_2$  на основе данных ИК Фурье-спектроскопии.

### Список литературы

1. Муратова, Е.Н., Мошников В.А., Алешин А.Н., Врублевский И.А., Лушпа Н.В., Тучковский А.К. Исследование и оптимизация процессов кристаллизации растворов гибридных галогенидных перовскитов состава  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  // Физика и химия стекла. 2023, том 49, № 6, с. 662–671.
2. Овезов М. К., Рябко А. А., Алешин А. Н., Мошников В. А., Кондратьев В.М., Максимов А. И. Вольтамперные характеристики перовскитных пленок  $\text{MAPbI}_3$ , сформированных одностадийным методом центрифугирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. Издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 2023.
3. Ершова, А. М., Овезов, М. К., Щербаков, И. П., Алешин, А. Н. Электрические свойства пленок металлоорганических перовскитов // Физика твердого тела. 2019, том 61, № 2, с. 243-247.
4. Исаев, Н. К., Алешин, А. Н. Фотоэлектрические свойства композитных пленок на основе металлоорганического перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  модифицированного смешанным эфиром целлюлозы // Физика твердого тела. 2021, том 63, №1, с. 152-156.
5. Akbulatov, A. F., Luchkin, S. Y., Frolova, L. A., Dremova, N. N., Gerasimov, K. L., Zhidkov, I. S., Anokhin, D.V., Kumraev, E.Z., Stevenson, K.J., Troshin, P. A. Probing the intrinsic thermal and photochemical stability of hybrid and inorganic lead halide perovskites // The journal of physical chemistry letters. 2017, vol. 8(6), p. 1211-1218.
6. Guo, R., Liu, Y., Fang, Y., Liu, Z., Dong, L., Wang, L., Wenyaoyao, L., Hou, J. Large-scale continuous preparation of highly stable  $\alpha\text{-CsPbI}_3/\text{m-SiO}_2$  nanocomposites by a microfluidics reactor for solid state lighting application // CrystEngComm. 2022, vol. 24(21), p. 3852-3858.

## КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАСЛЯНЫХ КРАСОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗА И СПЕКТРОСКОПИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

Грибовская О.С., Елефтериادي Э.А., Васильева А.В.

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе рассматривается комплексная методика анализа элементного состава железосодержащих масляных красок с использованием рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и спектроскопии лазерно-индуцированной плазмы (LIBS). Для исследования были подготовлены два образца, представляющих собой картонные подложки, на которые были нанесены железосодержащие пигменты разных цветов с масляным связующим. В работе приведены результаты исследования элементного состава пигментов и выявлены особенности идентификации отдельных элементов в составе пигментов.

*Ключевые слова:* ЛИБС, рентгенофлуоресцентный анализ, пигменты, железо, спектроскопия

Одной из важных задач в области сохранения культурного и исторического наследия является определение авторства произведения искусства и эпохи его создания с целью определения подделок. В частности, это является важным этапом диагностики для объектов живописи, например картин. Одним из способов определить возраст картины является анализ пигментов, входящих в состав красочных материалов. Например, железная (или берлинская) лазурь была получена только в 1706 году Иоганном Якобом Дисбахом [1], поэтому картины с синей краской из данного минерального пигмента не могут быть датированы ранее, чем началом 18 века. Другим ярким примером является использование волконскоита: данный минерал был открыт в 1830 году в Пермской губернии [2]. Поклонником глубокого зелёного цвета волконскоита являлся испанский художник Пабло Пикассо, заказывавший волконскоит из СССР [3], поэтому, проанализировав всего лишь один цвет на картине, можно с большой долей вероятности определить, является ли она подлинным творением Пикассо.

Перечисленные выше пигменты являются железосодержащими. В эту группу пигментов также входят другие разнообразные по цвету и составу пигменты на основе железа. Такие краски используются людьми со времён наскальной живописи и пользуются популярностью по сей день благодаря финансовой доступности, нетоксичности и простоте изготовления. Поэтому задача идентификации железосодержащих пигментов сегодня остается актуальной в мире искусства.

Одним из современных способов анализа состава красок является метод LIBS [4]. Среди его преимуществ особо выделяется простота в управлении, портативность, малоинвазивность и возможность использования метода для анализа небольших (от 0,5 мм) поверхностей.

Рентгенофлуоресцентный анализ – это еще один способ идентифицировать материалы, которыми создавалось произведение искусства [6]. Данный метод, как и LIBS, основывается на определении элементов в составе материала. РФА использует рентгеновское излучение, чтобы возбудить атомы исследуемого вещества и заставить его флуоресцировать. Так как каждый элемент имеет свой спектр флуоресценции, их можно

идентифицировать по энергии квантов вторичного рентгеновского излучения [6]. Основным преимуществом этого метода является неразрушающий анализ и его оперативность.

Таким образом, в данной работе рассматриваются особенности применения вышеперечисленных методов для определения элементного состава различных железосодержащих пигментов.

Для исследования были выбраны два железосодержащих пигмента – волконскоит (зелёный) и железная (берлинская) лазурь (синий), производителя “Натуральные пигменты” [2]. Были изготовлены два модельных образца, имитирующих слой масляной краски на холсте. Связующим для красок являлось льняное масло, толщина нанесенного красочного слоя составила 400 мкм, подложка - толстый “пивной” картон.

Для проведения исследования была использована установка LIBS (Onteko, США), включающая импульсный (доступны одноимпульсный, двухимпульсный и трехимпульсный режимы) Nd:YAG лазер наносекундного действия с размером пятна до 30 микрон, работающий на длине волны 1064 нм с максимальной энергией импульса 28 МДж. Также частью установки является спектрометр USB4000 (Ocean Insight, США), работающий в спектральном диапазоне 200–1100 нм с оптическим разрешением от 0,1 до 10 нм и временем интегрирования от 3,8 миллисекунд до 10 секунд. Кроме того, часть установки включает в себя следующее программное обеспечение: Ocean View (специализированное программное обеспечение для спектрометра) и встроенное программное обеспечение для обработки полученных результатов спектра. Образец помещали на расстоянии 7 см от выходного окна лазера. Для измерений использовался двухимпульсный режим с энергией импульса 5 МДж. В результате были получены эмиссионные спектры, пики которых указывают на присутствие в составе красок определённых химических элементов.

РФА анализ проводился рентгенофлуоресцентным анализатором “МетЭксперт” (Южполиметалл-Холдинг, Россия). К анализатору по сети Bluetooth подключается планшетный компьютер, снабженный программным обеспечением для обработки измерений спектров флуоресценции. Результаты в виде спектрограммы и процентного соотношения элементов выводятся на экран планшета. Время измерения составляло 20 секунд.

При сравнении полученных LIBS спектров с базами данных и научной литературой [7,8] было установлено содержание железа во всех образцах, а также наличие кремния, хрома и натрия в образце из волконскоита (рис. 1) и содержания калия и натрия в железной лазури (рис. 2), что соответствует химическому составу, заявленному производителем [2].

Метод РФА показал содержание железа в образце волконскоита 12,75% (рис. 3), а также высокое содержание хрома (48,86%) и кремния (35,12%), что характерно для зелёных пигментов. В образце железной лазури (рис. 4) содержание железа составляет 97,4%. При анализе железной лазури также был найден цинк (1,3%), а при анализе волконскоита – алюминий (3%). Малое процентное соотношение этих элементов говорит о том, что они присутствуют в образцах как примеси.

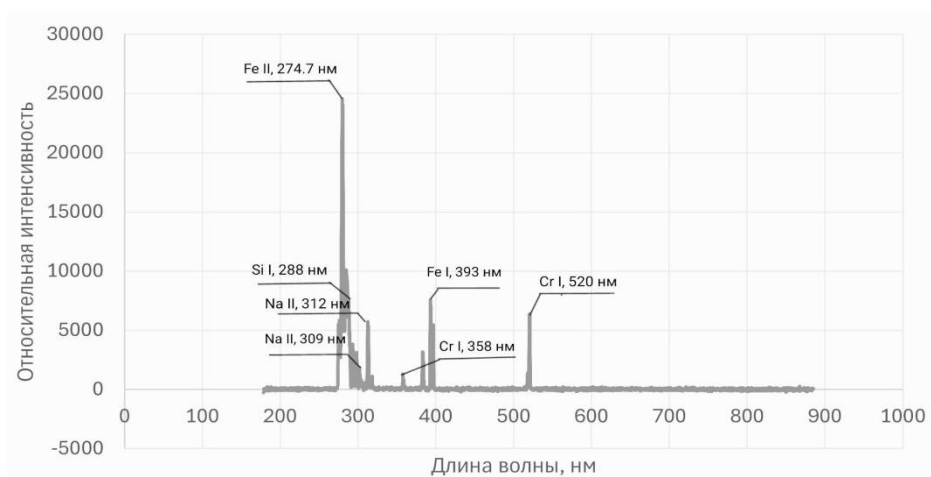


Рис. 1. LIBS-спектр волконскоита

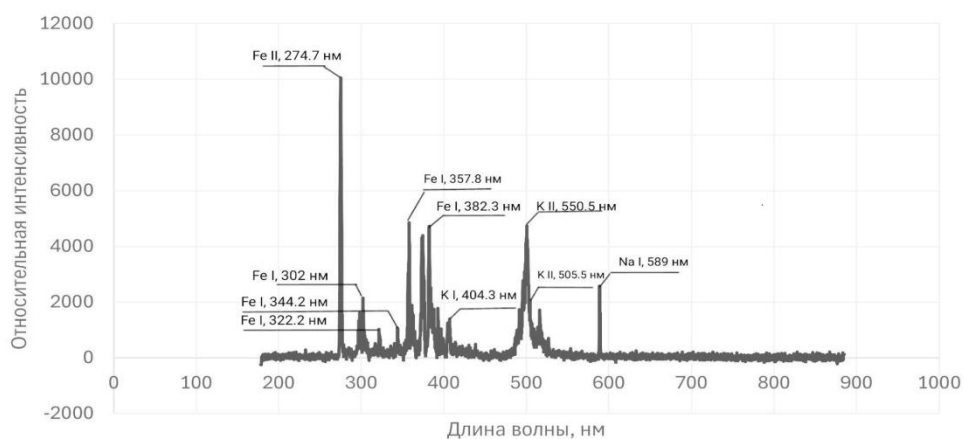


Рис. 2. LIBS-спектр железной лазури

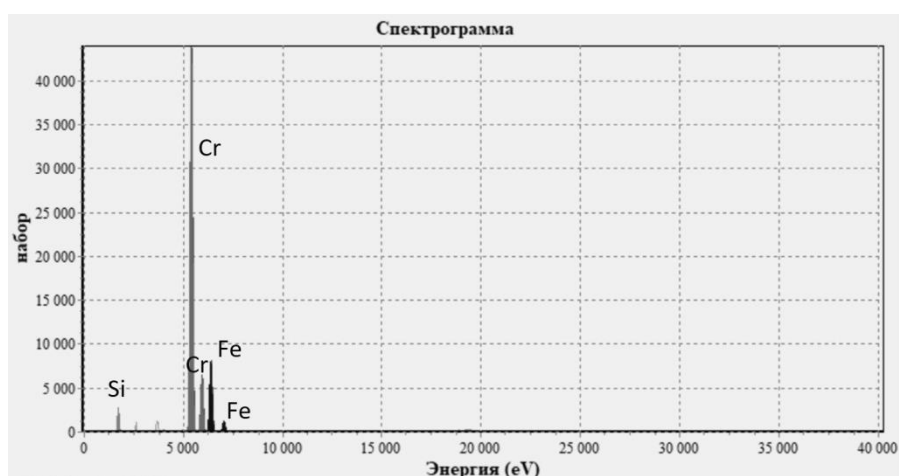


Рис. 3. Спектр флуоресценции волконскоита



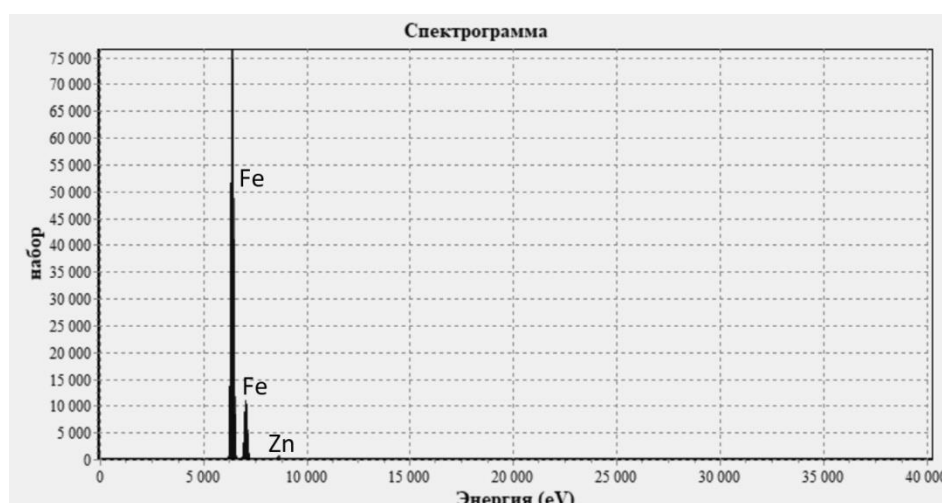


Рис. 4. Спектр флуоресценции железной лазури

В ходе проведения исследований было установлено, что несмотря на то, что оба способа одинаково точно обнаруживают наличие железа, хрома и кремния в образцах, некоторые элементы обнаруживаются только одним из способов (натрий и калий для LIBS, цинк и алюминий для РФА). Также в сравнении метод спектроскопии лазерно-индуцированной плазмы даёт возможность узнать валентность элемента в соединении, что позволяет более точно его идентифицировать, а метод РФА даёт больше информации о примесных элементах. Таким образом, совместное использование двух методов анализа способствует более точной идентификации химических элементов, а следовательно, позволяет наиболее достоверно указать состав исследуемого образца.

### Список литературы

1. Kraft. A. On the discovery and history of Prussian blue // Bulletin for the history of chemistry. - 2008. - №33. - С. 61-67.
2. Волконскоит // Натуральные пигменты URL: <https://natpigments.com/volkonskoit> (дата обращения: 20.04.24).
3. Волконскоит и Пикассо // Элементы URL: [https://elementy.ru/kartinka\\_dnya/290/Volkonskoit\\_i\\_Pikasso](https://elementy.ru/kartinka_dnya/290/Volkonskoit_i_Pikasso) (дата обращения: 20.04.24).
4. Anglos D., Balas C., Fotakis C. Laser spectroscopic and optical imaging techniques in chemical and structural diagnostics of painted artwork // American laboratory. - 1999. - №31. - С. 60-67.
5. Mantler M., Schreiner M. X-ray fluorescence spectrometry in art and archaeology // X-ray Spectrometry. - 2000. - №29. - С. 3-17.
6. Ширкин Л.А. Рентгенофлуоресцентный анализ объектов окружающей среды: учебное пособие. – 2009. 58 с.
7. NIST LIBS Database // National Institute of Standards and Technology URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/LIBS/libs-form.html> (дата обращения: 27.04.24).
8. LIBS Spectra // LIBS Info URL: <https://libs-info.com> (дата обращения: 27.04.24).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ХОДЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО РОСТА КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Н. А. ГРИЦЕНКО, Т. Д. АРАКЕЛЯН, А.Р.ВАНЦЕВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается моделирование процессов в ходе эпитаксиального роста карбида кремния с использованием метода молекулярной динамики. Исследование направлено на анализ влияния различных политипов и дефектов структуры, инородной и рельефной подложек на процессы эпитаксиального роста карбида кремния. Особое внимание уделено анализу особенностей полученных слоев. Цель исследования: разработка компьютерной модели роста карбида кремния с использованием возможностей, предоставляемых программой LAMMPS.

*Ключевые слова:* карбид кремния, молекулярная динамика, компьютерное моделирование.

### **Введение**

Эпитаксия карбида кремния (SiC) является важным направлением современной микроэлектроники и электронной промышленности в целом. Это связано с уникальными свойствами этого материала, такими как высокая термостабильность, механическая прочность, теплопроводность (выше кремниевой более чем в 2 раза) и высокое пробивное напряжение (выше, чем у кремния примерно в 10 раз). Однако, для создания максимально бездефектных структур на основе SiC необходимо уметь контролировать процесс роста эпитаксиального слоя.

Актуальность данной работы обусловлена стремительным ростом спроса на структуры с новыми материалами, такими как SiC, что помогут нивелировать недостатки кремниевой технологии. Компьютерное моделирование роста SiC позволяет довольно точно предсказать характеристики получаемых кристаллов, с минимальными затратами на эксперименты, что в свою очередь приводит к улучшению качества и снижению стоимости производства. Вместе с тем, такие исследования способствуют разработке новых методик синтеза и роста SiC кристаллов с определенными свойствами для различных областей применения.

### **Метод моделирования молекулярной динамики**

Метод молекулярной динамики (Molecular Dynamics, MD) представляет собой вычислительный подход к моделированию, который позволяет анализировать динамическое поведение и взаимодействие атомов и молекул в системе на протяжении заданного временного интервала. В рамках MD осуществляется симуляция движения атомов, при этом их взаимодействие моделируется с использованием эмпирических или аналитических потенциалов.

При моделировании силы межатомного взаимодействия используются потенциальные функции, которые описывают энергию связи и взаимодействие между атомами в системе. Эти потенциалы представляются в форме градиента потенциальной энергии системы и вычисляются на основе расстояния и углов между атомами.

Метод молекулярной динамики (МД) применяет эти потенциалы для прогнозирования движения атомов и изменений в системе со временем. Сначала предполагается задание граничных условий системы, а также координат и скоростей атомов. На каждом временном интервале силы рассчитываются с помощью градиента потенциала и

применяются для коррекции позиций и скоростей атомов в соответствии с уравнениями движения Ньютона.

### Формирование кристаллических структур и подложек различных политипов SiC

Прежде чем начинать моделирование эпитаксиального роста SiC необходимо задать подложку. Для того, чтобы модель больше соответствовала реальности подложка будет иметь следующие точечные дефекты: примесные атомы, вакансии, междоузельные атомы. Полученные элементарные ячейки представлены на рисунке 1.

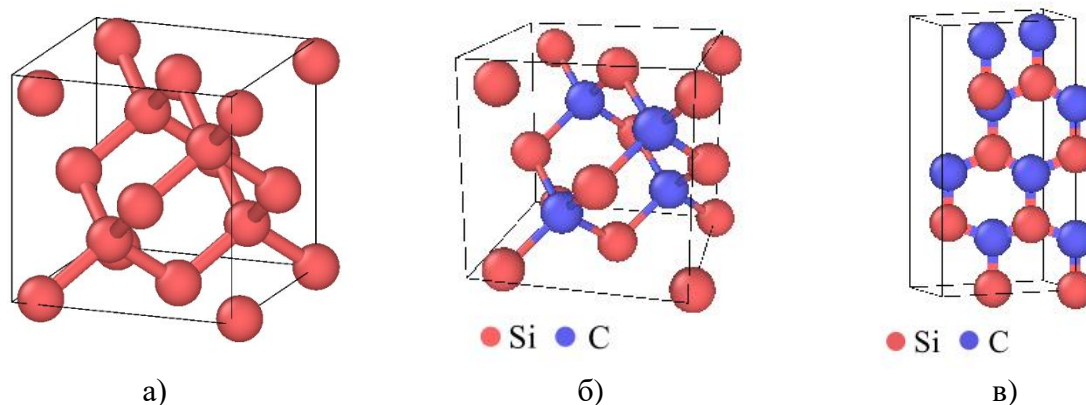


Рис. 1. Элементарные ячейки: а – Si; б – 3C – SiC; в – 4H – SiC

Затем, с помощью трансляционной симметрии получим подложки (рисунок 2).

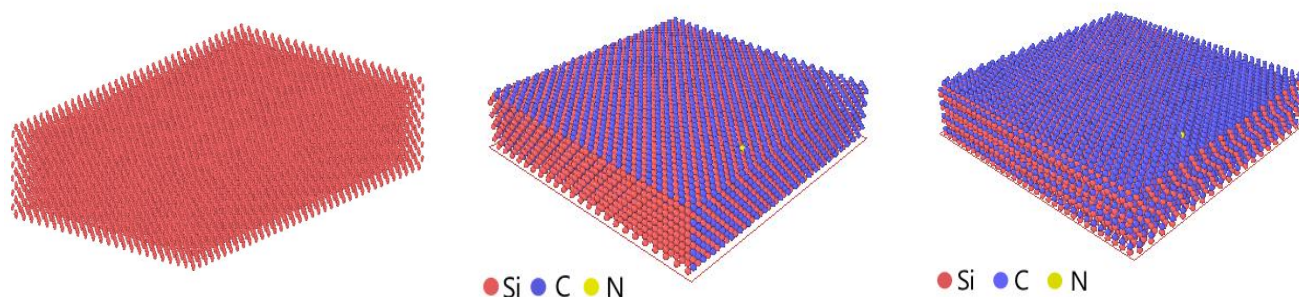


Рис. 2. Модели подложек: а – кремниевая подложка; б – 3C – SiC подложка; в – 4H – SiC подложка

Перед началом роста эпитаксиального слоя карбида кремния на кремниевой подложке необходимо провести карбидизацию. Этот процесс включает в себя взаимодействие подложки из кремния с углеродосодержащим источником, таким как пропан или метан, при температуре порядка 1020°C. При этом углерод проникает в поверхностный слой подложки, однако добиться стехиометрического состава и монокристаллической структуры удастся только после восстановительного отжига. Структура непосредственно после взаимодействия подложки и углеродного источника в процессе карбидизации представлена на рисунке 3.

Следующей целью является создание рельефной поверхности. Рельефные поверхности используются в микро- и нанoeлектронике для ускорения процесса эпитаксиального роста и создания оптимальных условий для формирования электронных устройств. Подложка с рельефной поверхностью представлена на рисунке 4.

Вициальная поверхность требует особой точности в отношении угла между основной кристаллографической плоскостью и ступенями. Для достижения оптимальных условий роста, этот угол должен быть меньше 5 градусов.

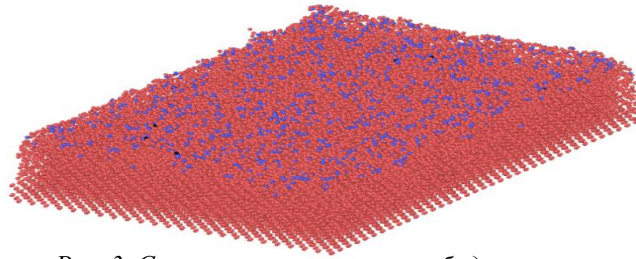


Рис. 3. Структура в процессе карбидизации

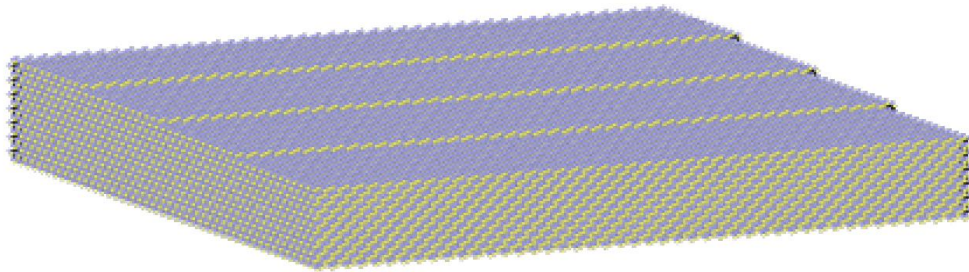


Рис. 4. Структура подложки 3C – SiC с вициальной поверхностью

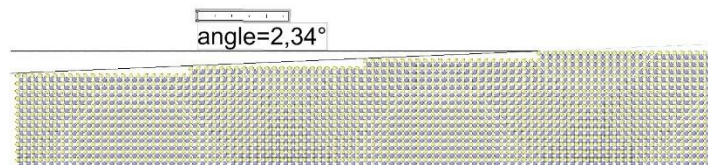


Рис.5. Угол между ступенями и основной кристаллографической плоскостью (100)

### Результаты моделирования

Рост методом CVD кристаллов SiC моделировался введением атомов в случайно выбранных точках поперечного сечения вакуумного пространства над поверхностью подложки и с постоянной скоростью введения для каждой модели.

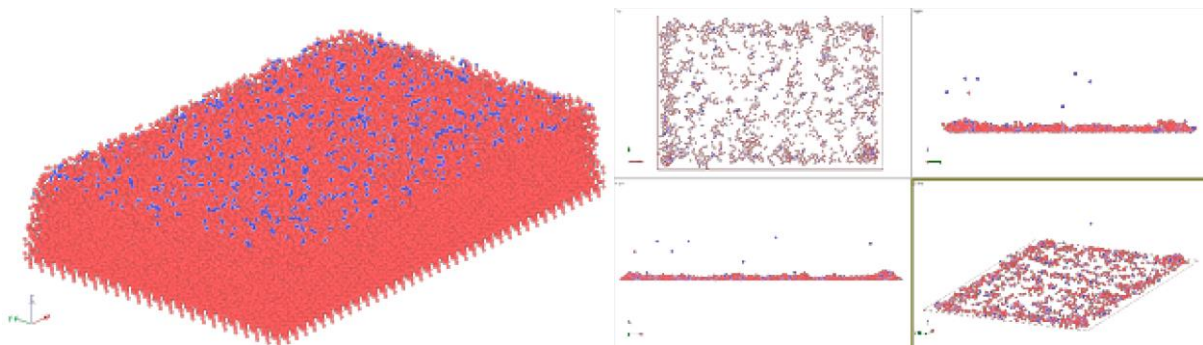


Рис. 6. Структура подложки после процесса осаждения



Структура карбидизированного слоя перед отжигом имеет вид, показанный на рисунке 6, где красные частицы – атомы кремния, а синие – углерода. Использование инструмента «slice» позволяет выявить среднюю глубину проникновения атомов углерода в подложку, что в данном приближении составляет 3 Å. Из-за отражающих стенок по бокам подложки образуются дефектные области, где преимущественно происходит рост.

На рисунке 7 представлена конечная структура на подложке с вицинальной поверхностью. Из-за большей плотности собственных атомов краевые условия оказывают большее влияние на структуру слоя.

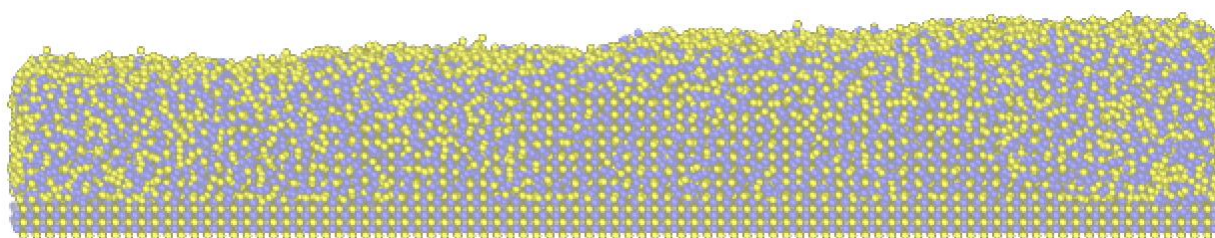


Рис. 7 Структура подложки после процесса осаждения с вицинальной поверхностью

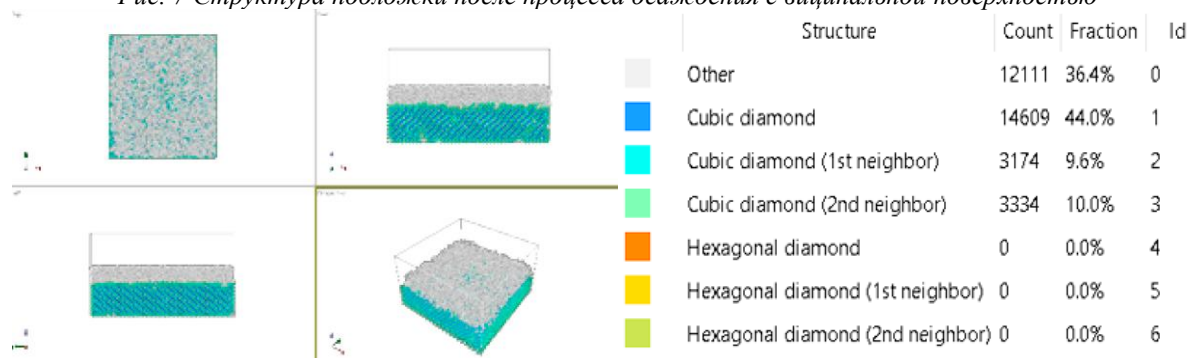


Рис. 8. Структура подложки после процесса осаждения с анализом выращенной пленки с использованием метода IDS

Характеристики укладки и локального расположения атомов в моделях можно проанализировать с использованием метода “Identify diamond structure (IDS)” (рисунок 8). Путем анализа координационной структуры всех атомов в ближайших и вторых ближайших соседних оболочках каждого атома характеристики укладки и локального расположения могут быть классифицированы по семи представленным на рисунке категориям, исходя из которых можно сделать вывод о политипном составе получающихся слоев.

### Заключение

Данная работа имеет значимость для разработки и оптимизации процессов эпитаксиального роста карбида кремния. Результаты и выводы работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях и практических разработках в области электроники, оптоэлектроники и других технологий на основе карбида кремния.

### Список литературы

1. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Лучинин В.В., Решанов С.А. Анализ эпитаксии карбида кремния из газовой фазы как базового процесса в технологии силовой электроники. Обзор // Изв. Вузов. Электроника 2020. Т. 25. №6. С. 483-496. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-6-483-496

2. Bertrand, P. et al. Vicinal surfaces as templates for self-organized nanostructures // Journal of Physics D: Applied Physics. 2019
3. Harris, G.L. Properties of Silicon Carbide. London: IET, 1995.
4. Мануал по программе LAMMPS // LAMMPS Molecular Dynamics Simulator. URL: <https://docs.lammps.org/Manual.html>
5. Growth of large-scale heteroepitaxial 3C-SiC films and nanosheets on silicon substrates by microwave plasma enhanced CVD at higher powers/C. Wang, N. Huang, H. Zhuang a.o.//Surface & Coating Technology. 2016, release (№)299. P.96-103.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА

ДЖУРАЕВА Е.Н., НОВИКОВ И.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Объектом исследования является синтез наноструктур оксида цинка гидротермальным методом для фотокатализа.

*Ключевые слова:* оксид цинка, фотокатализ

Оксид цинка ZnO – прямозонный полупроводник с  $E_g \approx 3,37$  эВ, обладающий n-типом электропроводности и кристаллизующийся в структуре типа вюрцит [1]. ZnO широко применяется для формирования прозрачных проводящих покрытий, пассивирующих слоев, активных элементов ячеек солнечных модулей, газовых сенсоров [2], а также активных элементов пьезоэлектрических устройств.

Также, наноструктуры ZnO могут быть успешно использованы в гетерогенном фотокатализе при разложении различных органических загрязнителей в водной фазе, таких как ароматические и алифатические соединения, красители и др. [3]. Целью данной работы являлось изучение возможностей синтеза и влияния морфологии полученных порошкообразных структур ZnO на фотокаталитическую активность и эффективность разрушения органических загрязнителей.

В данной работе синтез наноструктур оксида цинка проводили гидротермальным методом. Гидротермальный синтез – это синтез, основанный на способности воды и водных растворов растворять при высоких температурах (до 500°C) и давлении (10–80 МПа, иногда до 300 МПа) вещества, практически нерастворимые в обычных условиях [4,5]. Данный метод прост в реализации и экологичен, происходит при относительно низких температурах, характеризуется простотой контроля параметров морфологии и свойств получаемого материала [6,7].

Для получения наноструктур применялся раствор объемом 100 мл, содержащий ацетат цинка и гексаметиленetetрамин (ГМТА), позволяющий снизить температуры синтеза до 100°C. Данный раствор помещался в циркуляционный термостат и выдерживался 2 часа. Параметры синтеза структур указаны в таблице 1. По окончании синтеза, получившийся порошок оксида цинка извлекался из раствора, промывался и подвергался отжигу при 250°C.

Исследование фотокаталитической активности полученных порошковых структур проводили в процессе разрушения органического красителя Родамина 6G C<sub>28</sub>H<sub>31</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Cl. Максимум поглощения для данного вещества находится на длине волны 525 нм. Объем раствора подвергающегося воздействию фотокатализатора брался равным 25 мл,

растворителем являлась дистиллированная вода. Изображение получившихся структур и спектры поглощения Родамина 6G в присутствии катализатора представлены на рис. 1-3.

Таблица 1

Параметры синтеза

№	Концентрация прекурсоров, М	Время синтеза, ч	Температура синтеза, °С
1	0,03	2	80
2	0,02	2	90

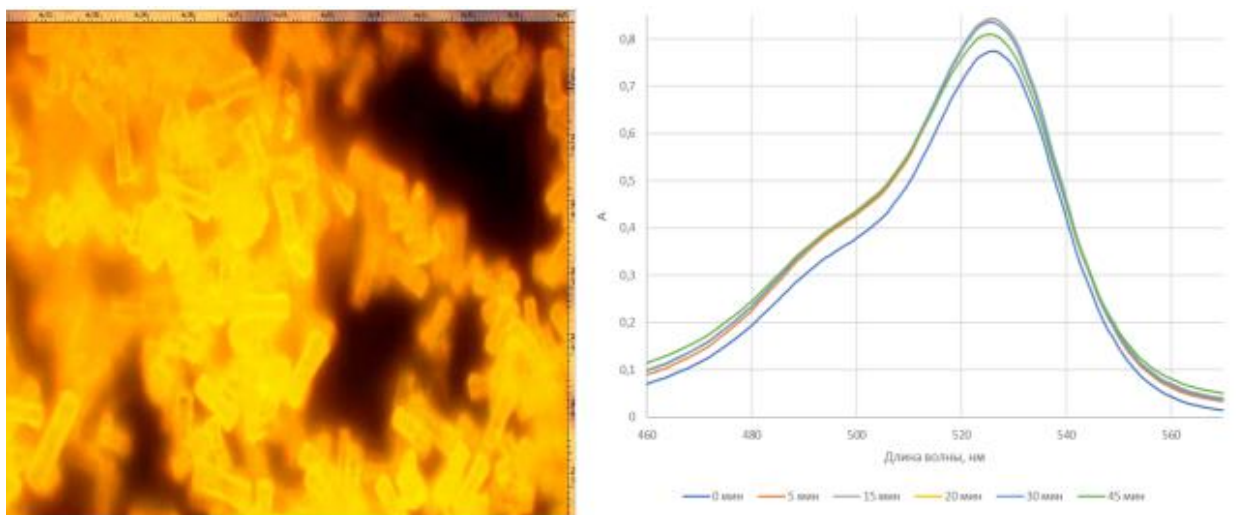


Рис. 1. Изображение первого образца, полученное с помощью оптического микроскопа и спектр поглощения Родамина 6G в присутствии первого образца

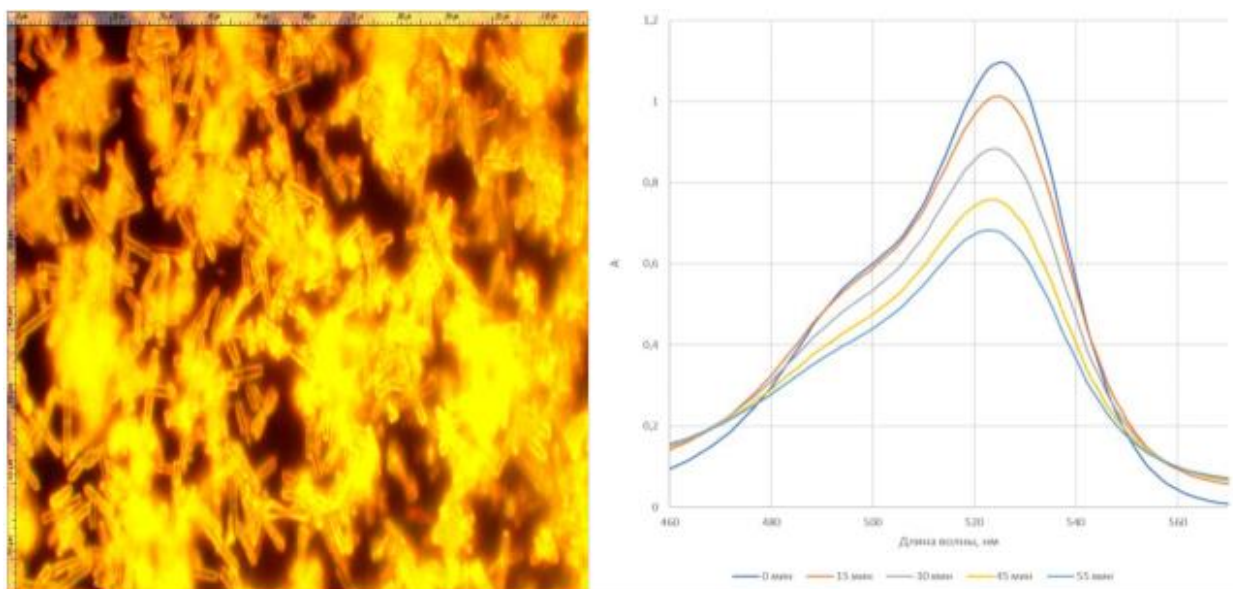


Рис. 2. Изображение второго образца, полученное с помощью оптического микроскопа и спектр поглощения Родамина 6G в присутствии второго образца

В результате данной работы установлено, что изменение параметров синтеза позволяет управлять формой, размерами и типом структуры, выращиваемой

гидротермальным методом. Были получены наностержни ZnO с длиной 8 мкм и диаметром 1 мкм (образец 1); с длиной 5 мкм и диаметром 3 мкм (образец 2) в среднем. Вследствие исследования фотокаталитической активности в процессе разрушения органического красителя Родамина 6G в пересчете на грамм образца в присутствии полученных структур получились значения 1,86 и 3,27 М/мг соответственно и оказалось, что образец 2 обладает большим фотокаталитическим потенциалом. Такой результат может объясняться тем фактом, что у массива частиц с меньшей длиной общая удельная поверхность больше, чем у массива частиц с большей, а значит и больше их реакционная способность.

### Список литературы

1. Бобков А.А., Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитических свойств наноструктур оксида цинка, легированных магнием // Сборник научных трудов «Нанозифика и Наноматериалы». 2021. С. 34-42.
2. Бобков А.А. Физико-технологические основы управления функциональными свойствами газочувствительных сенсоров на основе наностержней оксида цинка // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, СПб.: Изд СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019.
3. Пермяков Н.В., Мараева, Е.В. Бобков А.А. и др. Исследование материалов на основе ZnO для задач катализа и медицинского материаловедения // Межд. Семинар Нанозифика и наноматериалы, СПб.: Горный ун-т, 2022.- С. 213-217.
4. Якушова Н.Д. Физико-технологические особенности формирования полупроводниковых наноматериалов на основе оксида цинка для фотокаталитических приложений // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Национальный исследовательский университет МЭИ Москва, 2023.
5. Бобков А.А., Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитических свойств наноструктур оксида цинка, легированных магнием // Сборник научных трудов «Нанозифика и Наноматериалы». 2021. С. 34-42.
6. Радайкин Д.Г., Бобков А.А., Мошников В.А. Исследование влияния внедренных наночастиц серебра на фотокаталитическую активность ZnO // НАУЧНЫЙ АЛЬМАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ. 2022. № 1-9. С. 12-20.
7. Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитической активности частиц оксида цинка, модифицированных наночастицами серебра // Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2022", секция "Химия". 2022. С. 292.
8. Sorption analysis of composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science / Maraeva E., Radaikin D. [et al]. // *Chimica Techno Acta*. 2022. Vol. 9. №. 4. 20229422.

## АНАЛИЗ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ РЕЗОНАНСНОГО ТУННЕЛИРОВАНИЯ

ДОМОРАЦКИЙ Е.В., ЗАХАРЧЕНКО М.В., ГЛИНСКИЙ Г.Ф.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В настоящей работе исследуются эффекты туннелирования носителей заряда в рамках микроскопической теории, учитывающей атомарное строение полупроводниковых гетероструктур. В работе использован универсальный подход к решению задачи о туннелировании носителей заряда посредством решения неоднородного уравнения Шредингера. Задача решается в **к**-представлении методом теории функций Грина посредством введения в систему вспомогательного чисто мнимого потенциала. В работе рассмотрены однобарьерная и двухбарьерная структуры, для которых определены энергетические спектры коэффициента прохождения носителей заряда.

*Ключевые слова:* резонансное туннелирование, туннелирование носителей заряда

Резонансное туннелирование – прохождение носителей заряда через системы из одиночного или множественных потенциальных барьеров при условии равенства энергии



носителей заряда и энергии резонанса в системе. Данное явление в настоящее время используется в разработке ряда устройств нанoeлектроники – квантово-каскадных структур, полупроводниковых оптических усилителей и других полупроводниковых приборов [1-5].

Как правило, математический анализ резонансного туннелирования в квантоворазмерных структурах проводится с использованием решения уравнения Шрёдингера в координатном представлении методом матриц переноса. Такой способ расчёта имеет высокую точность вычисления коэффициента прохождения, однако требует больших программных мощностей, а также связан с необходимостью задания большого числа граничных условий в случае многобарьерных структур и сложного (вырожденного) характера энергетических зон исходных материалов [6-7].

В настоящей работе задача о туннелировании носителей заряда решается в рамках метода функций Грина. Запишем соответствующее неоднородное уравнение Шрёдингера в общем виде

$$[\hat{H} - E]|\psi(E)\rangle = |\rho\rangle. \quad (1)$$

Здесь  $\hat{H}$  – гамильтониан квантовой системы,  $|\psi(E)\rangle$  – вектор, описывающий состояние носителя заряда с заданной энергией  $E$ ,  $|\rho\rangle$  – вектор, характеризующий источник частиц.

Более общий и удобный подход к исследованию резонансного туннелирования может быть сформулирован в рамках биортогонального подхода к анализу квантовых систем, описываемых неэрмитовыми операторами [8-9]. Математическая формулировка биортогональной теории основана на поиске двух наборов собственных векторов и собственных значений данного неэрмитова гамильтониана и его сопряженного оператора. Спектральные проблемы для определения собственных значений и собственных векторов имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{H}|\psi_n^r\rangle &= E_n|\psi_n^r\rangle, \\ \hat{H}^\dagger|\psi_n^l\rangle &= E_n^*|\psi_n^l\rangle, \end{aligned}$$

где  $|\psi_n^r\rangle$  и  $|\psi_n^l\rangle$  – «правый» и «левый» собственные векторы соответственно, которые связаны условиями биортонормированности и полноты

$$\begin{aligned} \langle\psi_n^l|\psi_{n'}^r\rangle &= \delta_{nn'}, \\ \sum_n |\psi_n^r\rangle\langle\psi_n^l| &= 1. \end{aligned}$$

Применение метода функций Грина наиболее удобно для анализа непрерывного энергетического спектра. Параметрически зависящий от энергии частицы оператор Грина для уравнения Шрёдингера (1) может быть записан в общем виде как

$$\hat{G}(E) = (\hat{H} - E)^{-1}.$$

Используя базис Кона-Латтинжера, можно перейти к решению уравнения Шрёдингера (1) методом эффективной массы [11], в рамках которого матричные элементы гамильтониана задачи в общем случае различны для различных зон. Пренебрегая кр-поправками и ограничившись рассмотрением одной зоны, можно перейти к однозонному гамильтониану, который в  $\mathbf{k}$ -представлении имеет следующий вид

$$H(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} + V(\mathbf{k} - \mathbf{k}').$$

где  $V(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$  – фурье-образ оператора потенциальной энергии.

Окончательно, можно определить матричные элементы оператора Грина в  $\mathbf{k}$ -представлении в виде разложения по собственным биортонормированным состояниям

$$G_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}(E) = \sum_n \frac{\langle \mathbf{k} | \psi_n' \rangle \langle \psi_n' | \mathbf{k}' \rangle}{E_n - E}.$$

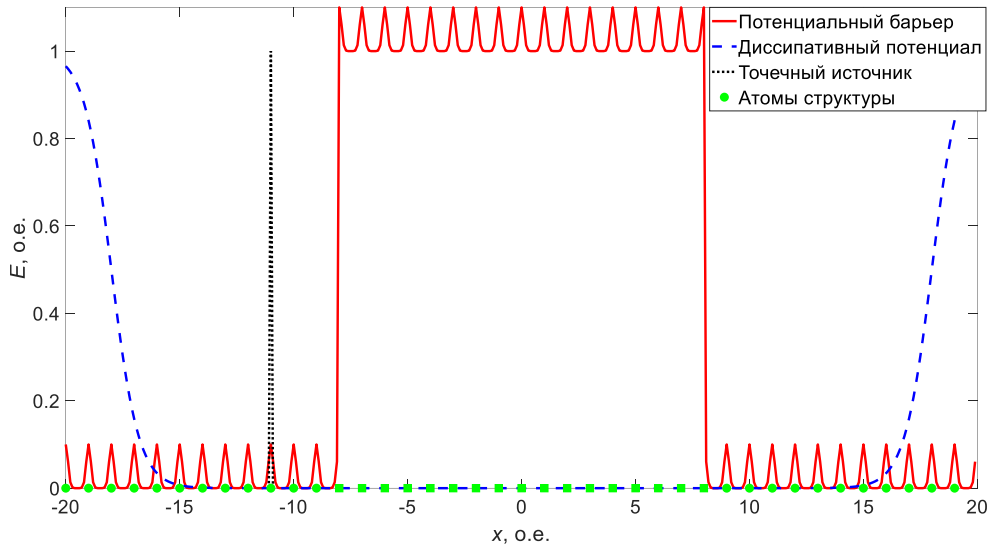


Рис. 1. Структура с одиночным потенциальным барьером

В работе рассмотрена однобарьерная структура, представленная на рисунке 1. Здесь показано положение источника частиц, распределение действительного потенциала барьера и чисто мнимого потенциала на границах структуры, а также положение атомов материала. Рассчитанная энергетическая зависимость коэффициента прохождения представлена на рисунке 2.

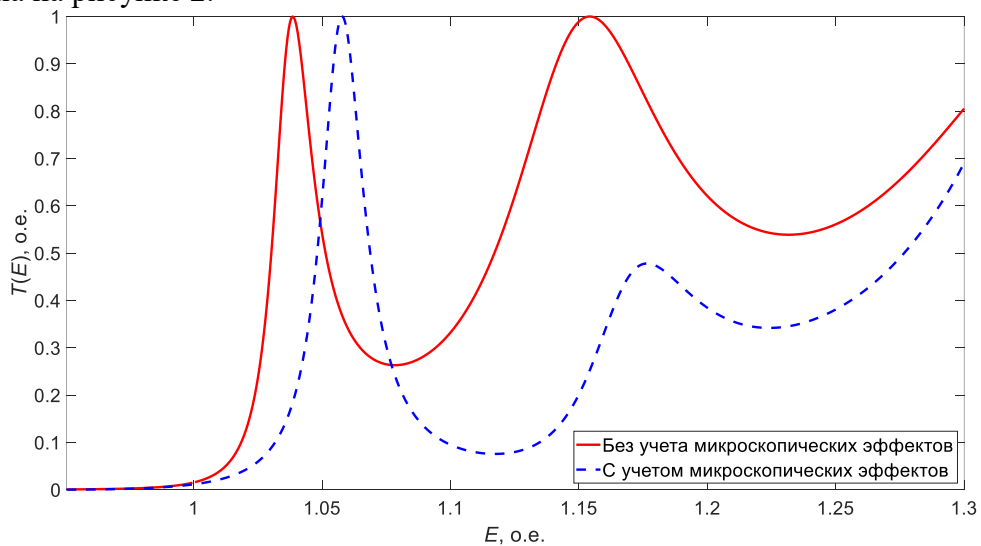


Рис. 2. Энергетические зависимости коэффициента прохождения без учета микроскопических эффектов (красная сплошная линия) и с учетом микроскопических эффектов (синяя пунктирная линия)

Как можно отметить, учет эффектов, накладываемых микроскопическим потенциалом, приводит к смещению положения пиков энергетической зависимости и изменению их амплитуды, уточняя при этом положение резонансных пиков и их интенсивность.

В работе исследованы микроскопические эффекты резонансного туннелирования в однобарьерной и двухбарьерной структурах. Показано, что введение таких поправок корректирует расчет энергетической зависимости коэффициента прохождения и приводит к смещению положения резонансных пиков и изменению их интенсивности. В работе показана зависимость изменения энергетического спектра коэффициента прохождения от параметров микроскопического потенциала.

### Список литературы

1. Galeti H. V. A., Bezerra A. T., Y. Galvao Gobato, Brasil M. J. S. P., Taylor D., Henini M. Optical and electrical control of spin polarization of two-dimensional hole gases in p-type resonant tunnelling devices // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – Т. 46. – №. 50. – С. 505313.
2. Lin S., Wang D., Tong Y., Wang X. III-nitrides based resonant tunneling diodes // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Т. 53. – №. 25. – С. 253002.
3. Huang X., Qin C., Yu Y., Zhang X., Acceleration of carrier recovery in a quantum well semiconductor optical amplifier due to the tunneling effect // JOSA B. – 2012. – Т. 29. – №. 10. – С. 2990-2994.
4. Bhourri A., Rached A., Lazzari J. L., Resonant tunneling transport in  $Al_zGa_{1-z}N/In_xGa_{1-x}N/Al_zGa_{1-z}N/In_yGa_{1-y}N$  quantum structures // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Т. 48. – №. 38. – С. 385102.
5. Zhao L., Gao L., Reno J. R., Kumar S., Resonant-tunneling Transport of Holes in Terahertz GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Superlattices // Advanced Solid State Lasers. – Optica Publishing Group, 2016. – С. AM5A. 21.
6. Mukherjee K., Das N. R. Tunneling current calculations for nonuniform and asymmetric multiple quantum well structures // Journal of Applied Physics. – 2011. – Т. 109. – №. 5.
7. Morrison G. B., Cassidy D. T. A probability-amplitude transfer-matrix method for calculating the distribution of light in semiconductor lasers // IEEE journal of quantum electronics. – 2003. – Т. 39. – №. 3. – С. 431-437.
8. Brody D. C., Biorthogonal quantum mechanics // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2013. – Т. 47. – №. 3. – С. 035305.
9. Mostafazadeh A., Pseudo-Hermitian representation of quantum mechanics // International Journal of Geometric Methods in Modern Physics. – 2010. – Т. 7. – №. 07. – С. 1191-1306.
10. Захарченко М.В., Глинский Г.Ф. Теория резонансного туннелирования носителей заряда в рамках метода функций Грина и биортогонального формализма // ЖТФ. – 2023. – Т. 93. – № 10. – С. 1396-1400
11. Глинский Г. Ф. Простой численный метод определения энергетического спектра носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – №. 6. – С. 17-24.

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ $D_{33}$ ПЛЕНОК ПВДФ МЕТОДОМ «ПАДАЮЩЕГО ШАРИКА»

ЕМАНОВ Д.П., МОИСЕЕВ К.М., ОСИПКОВ А.С.

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана*

**Аннотация.** В работе описан метод «падающего шарика» для измерения пьезокоэффициента сегнетоэлектрических пленок на основе ПВДФ. Определены требования к элементам стенда. Рассмотрены этапы разработки и сборки экспериментального стенда для измерения пьезокоэффициента  $d_{33}$ . Приведена финальная конструкция стенда, использующаяся на практике для измерения пьезокоэффициентов ПВДФ пленок в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

*Ключевые слова:* ПВДФ, прямой пьезоэффект, индуцированный пьезозаряд, пьезомодуль

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2022-0007).

## Введение

Среди известных полимерных сегнетоэлектриков сополимеры на основе ПВДФ (ПФДФ-ТФЭ, ПФДВ-ТрФЭ и др.) обладают наибольшими значениями пьезо- и пирозлектрических коэффициентов, что определяет высокий интерес к таким материалам и функциональным структурам на их основе, а также высокий потенциал их применения в новых типах устройств гибкой гибридной электроники [1,2]. У плёнок ПВДФ отличная электрическая изоляция, высокая термостойкость и хорошая химическая стойкость.

Зачастую чувствительный элемент различного рода датчиков, расположен так, что деформация происходит вдоль оси поляризации [3], величина сигнала (заряда) в данном направлении зависит от пьезокоэффициента  $d_{33}$ . Для корректной работы таких устройств, как пьезоэлектрические резонаторы, сенсоры (например, сканер отпечатка пальца, где давление приходится вдоль  $P$ ), вибрационные контролеры, осуществляющие виброизоляцию за счёт перевода периодического сжатия в электричество и многих других, необходим простой и надёжный метод измерения данного пьезомодуля.

Целью данной работы является разработка стенда для измерения пьезомодуля  $d_{33}$  методом «падающего шарика».

## Метод «падающего шарика»

Все существующие методы измерения пьезоэлектрических коэффициентов можно разделить на три группы: динамические, статические и квазистатические [4]. Основное различие в методах определено временем и способом внешнего воздействия. Квазистатические методы могут быть немного точнее других, но они гораздо сложнее в расчётах и в реализации. В отличие от динамических, статические методы проще в расчётах, поскольку необходимо лишь знать приложенную силу и количество сгенерированного заряда, без промежуточных действий по определению упругих констант, частоты резонанса и электрических характеристик образца.

Метод «падающего шарика» относится к статическим методам измерения пьезокоэффициентов [4]. Принцип работы данного метода основывается на механизме прямого пьезоэффекта – под действием нагрузки происходит деформация образца и пропорционально пьезомодулю плёнки генерируется заряд определённой величины. Таким образом, измерив величину сгенерированного заряда и зная приложенную силу, можно рассчитать пьезокоэффициент плёнки. На рисунке 1 приведена общая схема измерения данным методом.

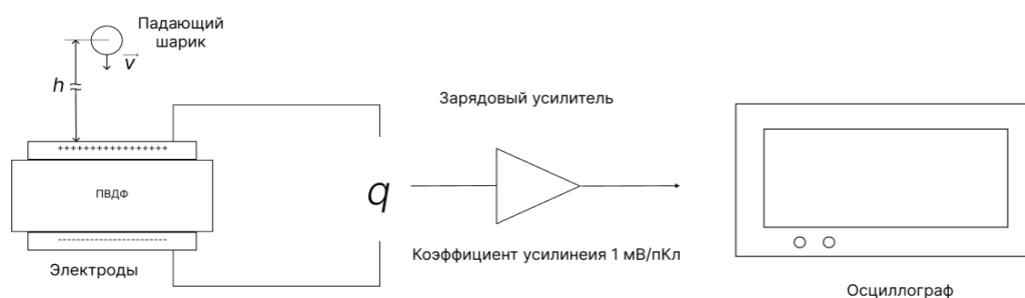


Рис. 1. Схема измерения пьезомодуля  $d_{33}$  методом «падающего шарика»

Образец помещается в специальную оснастку, обеспечивающую снятие сигнала, и защищающую его от электрических помех. Сгенерированный заряд через зарядовый усилитель переводится в напряжение и поступает на осциллограф. Когда шарик падает на плёнку, она сжимается, генерируя заряд определённого знака в зависимости от направления поляризации плёнки. В какой-то момент под действием упругих сил шарик будет подниматься вверх, тогда знак заряда изменится, и на осциллограмме появится пик. Амплитудное значение пика будет соответствовать приложенной силе. Через коэффициент усиления напряжение пика можно перевести в заряд.

Для определения силы удара падающего шарика выведена формула  $F(h)$  через второй закон Ньютона в импульсной форме и через упругое взаимодействие двух тел разной кривизны:

$$F_1 = m\sqrt{2gh} / \Delta t$$

$$F_2 = Kh^{3/5}R^2$$

### Разработка измерительного стенда

Разработка стенда проведена в несколько этапов. На первом этапе выполнены 2 задачи: обеспечено вертикальное падение шарика с разной высоты и снятие сигнала с образца. Для решения первой задачи предложено использование штатива и металлических трубок, играющих роль направляющих. Такое решение также позволило, меняя длину трубочки, варьировать высоту падения шарика.

Для снятия сигнала нужно подвести электрические контакты к плёнке. Нижний электрод сделан из медной фольги и заземлён. Верхний электрод сделан с использованием магнита, который также выполняет роль держателя. На рис. 2 показан собранный стенд.



Рис. 2. Стенд, 1-й этап разработки

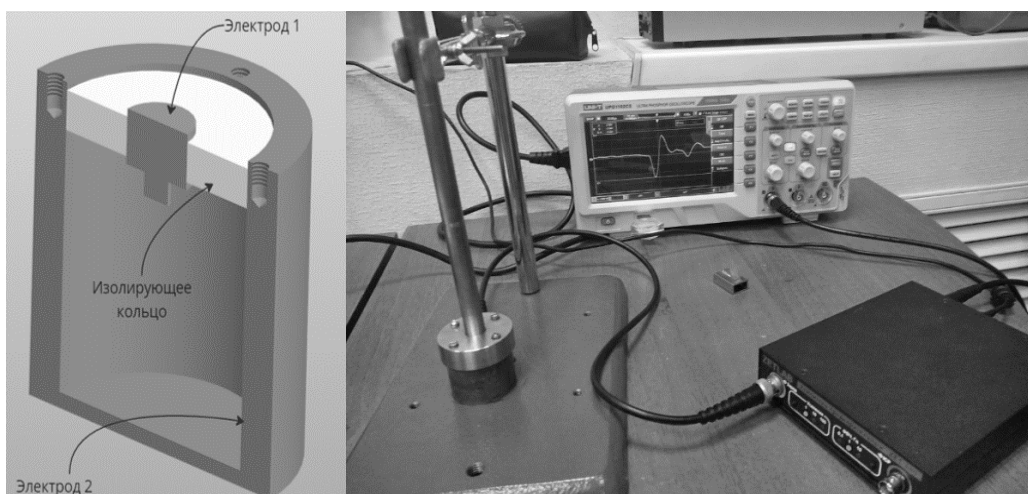


Рис. 3. Стенд, 2-й этап разработки

Пробные изменения показывают, что качество сигнала плохое, поскольку образец воспринимает электромагнитные помехи. Поэтому на втором этапе спроектирована оснастка для снятия сигнала, изолирующая образец от внешних электрических помех (рис. 3).

Данная конструкция позволяет провести измерения и получить значения пьезомодуля, несильно отличающиеся от значений, заявленных производителем, но при этом имеющие существенную неоднородность. При детальном анализе конструкции определены несколько причин, предположительно влияющих на качество выходного сигнала:

1. Трубочка ненадёжно закреплена, из-за чего имеет наклон, который влияет на траекторию падения шарика;
2. В конструкции измерительной ячейки присутствует упругая изолирующая мембрана, которая вызывает демпфирующие помехи, что сказывается на выходном сигнале.

Третий этап заключался в устранении данных недостатков конструкции. Для надёжного крепления трубочки разработана и изготовлена направляющая, а для уменьшения упругих помех разработана новая оснастка.

Новая оснастка состоит из массивного корпуса, изолирующего фторопластовый держатель, и принимающего центрального электрода. В корпусе сделаны два отверстия: одно под BNC разъём, второе для термопары, что позволяет измерять температуру вблизи образца. Обод на крышке обеспечивает центрирование её при установке. Дополнительно у корпуса выполнен фланец для возможности крепления на массивное основание. Прижатие крышки обеспечивается гайками типа барашек, что обеспечивает удобство сборки-разборки.

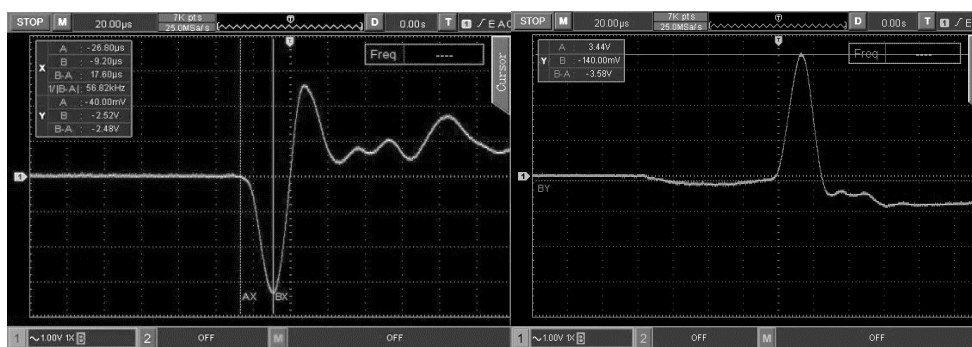


Рис. 4. Сравнение графиков выходного сигнала двух оснасток

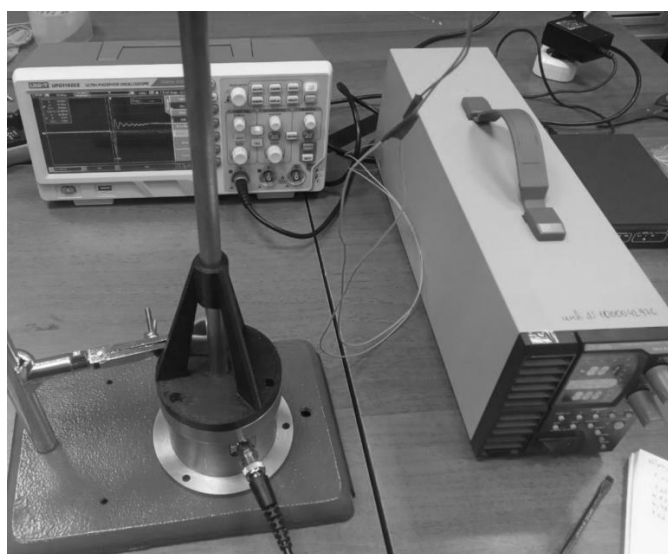


Рис. 5. Стенд, 3-й этап разработки

В отличие от предыдущей, новая оснастка имеет массивный корпус, изоляция электродов выполнена через полый цилиндр типа «стакан», а не кольцо. Всё это позволяет снизить демпфирующие помехи. На рис. 4 показано изменение сигнала: слева сигнал с использованием старой оснастки, справа – новой.

В итоге в результате изменений в конструкции стенда улучшено качество выходного сигнала, а также повышена воспроизводимость измеряемых данных.

Итоговый вид стенда представлен на рис. 5.

### Заключение

В рамках проделанной работы разработан и собран измерительный стенд для измерения пьезомодуля  $d_{33}$  сегнетоэлектрических пленок на основе ПВДФ методом «падающего шарика». Стенд реализован и используется в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

### Список литературы

1. Kochervinskii V.V. "The properties and applications of fluorine-containing polymer films with piezo- and pyro-activity" Turpion - Moscow Ltd 63(1964): 367–371.
2. Chen, Xin, Xu Han, and Qun-Dong Shen. PVDF-based ferroelectric polymers in modern flexible electronics." Advanced Electronic Materials 3.5 (2017) - P.1600460.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 – 17(18) мая 2024

3. Mohammadpourfazeli, S., Arash, S., Ansari, A., Yang, S., Mallick, K., Bagherzadeh, R. Future prospects and recent developments of polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric polymer; fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties. RSC advances 13.1 (2023) – P. 370-387.

4. Акопян В. А. Методика определения пьезоэлектрического модуля d33 и исследование границ ее применения //Дефектоскопия. – 2003. – №. 6. – С. 29-38.

## **ИНТЕГРАЦИЯ ИСТОЧНИКА-ИЗМЕРИТЕЛЯ KEYSIGHT B2901A С ЗОНДОВОЙ СТАНЦИЕЙ В РАМКАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР**

ЕМЕЛЬЯНОВ И.Д.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе представлена модернизация лабораторного комплекса для измерения электрофизических характеристик полупроводниковых материалов и структур. Для повышения чувствительности измерений по току при исследовании структур на ультраширокозонном алмазе, предложено интегрировать прецизионный источник-измеритель Keysight B2901A в существующий комплекс. Описан процесс автоматизации процесса измерения сопротивления с использованием Keysight B2901A, включая создание виртуального прибора для анализа вольт-амперных характеристик алмазных структур с нанесенными омическими контактами.

*Ключевые слова:* вольт-амперная характеристика, сверхширокозонный полупроводник, сверхмалые токи, автоматизация измерений, алмаз

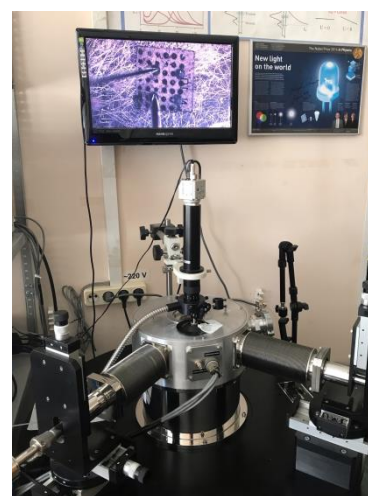
Используемые в современной микроэлектронике сверхширокозонные полупроводники, такие как SiC, AlN, C (алмаз) характеризуются большим диапазоном пробивных напряжений и низкими характерными токами в обратном смещении [1]. Для количественной характеристики таких полупроводников необходимы прецизионные универсальные измерительные приборы, способные измерять сверхмалые токи ( $10^{-12}$  А и менее).

В настоящее время в распоряжении коллектива имеется комплекс спектроскопии адмиттанса, который состоит из нескольких ключевых компонентов, включая криогенную зондовую станцию Janis CCR10-2CXKEL, вакуумный пост Pfeiffer Hi Cube Eco 80, гелиевый криостат, контроллеры температуры LakeShore, LCR-метр Agilent E4980A. Этот комплекс позволяет проводить измерения электрофизических характеристик полупроводниковых структур и приборов в широком диапазоне температур [2].





а)



б)

Рис. 1. а) Keysight B2901A; б) комплекс спектроскопии адмиттанса

Для обеспечения измерения сверхбольших сопротивлений широкозонных полупроводников требуется большая чувствительность по току, чем у измерителя Agilent E4980A. Внедрение прецизионного параметрического анализатора B2901A (Keysight) в существующий комплекс решает эту проблему. Анализатор представляет собой настольный одноканальный прибор, в котором сочетаются возможности четырехквadrантного источника и измерителя тока и напряжения. Благодаря широким диапазонам выходного напряжения ( $\pm 210$  В с цепью блокировки и  $\pm 42$  В без нее) и силы тока (3 А в режиме постоянного тока и 10,5 А в импульсном режиме), а также минимальным разрешениям 1 пА для источника (в диапазоне 1 мкВ) и 100 фА для измерителя (в диапазоне 100 нВ), анализатор B2901A обеспечивает высокую точность определения характеристик тестируемой приборной структуры [3]. Приборы линейки B2900 поддерживают интерфейсы GPIB, LAN, USB. Взаимодействие с прибором осуществляется с помощью SCPI команд.

Целью данной работы была интеграция прибора B2901A в существующий измерительный комплекс и автоматизация процесса измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и расчета сопротивления полупроводниковых приборов и структур. Так как большая часть существующего в лаборатории программного обеспечения написана с использованием среды графического программирования LabView, было решено использовать эту среду программирования при создании программы измерения ВАХ с помощью нового прибора. Интерфейс созданной программы приведен на рисунке 2.

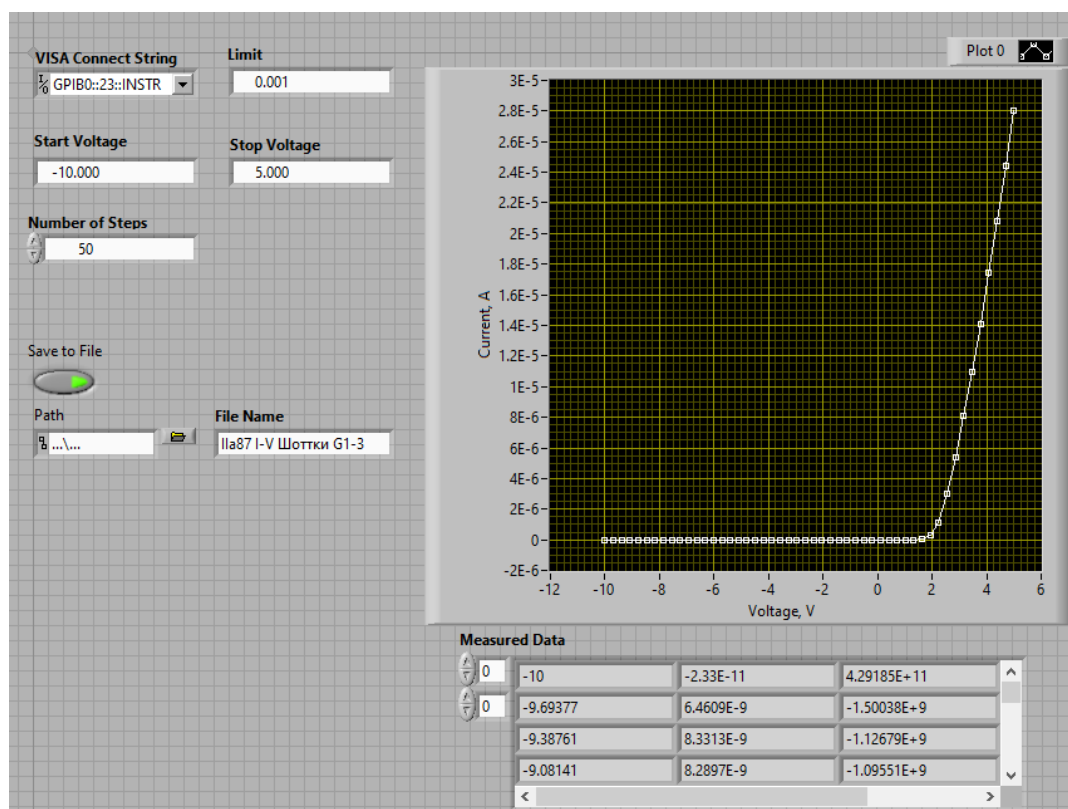


Рис. 2. Интерфейс Sub VI для измерения ВАХ

Разработанное ПО позволяет измерять ВАХ и сопротивление образца при комнатной температуре в выбранном диапазоне напряжений (задаваемых Start Voltage, Stop Voltage), с заданным числом шагов (Number of Steps) и ограничением по току (Limit), а также, по необходимости, может сохранять измерения в файл.

Основные блоки программы приведены ниже:

1. SetSweep.vi – отвечает за загрузку необходимых настроек в прибор;
2. Initiate.vi – формирует список измеряемых величин и их порядок, начинает процесс измерения;
3. GetData.vi – собирает измеренные данные из буфера прибора.

Далее, для реализации измерений ВАХ в диапазоне температур была проведена интеграция источника-измерителя с контроллером температуры LakeShore на программном уровне.

Логика работы второй созданной программы I-V-T-Keysight, реализующей измерения ВАХ и расчет сопротивления R образца в доступном диапазоне температур (22-470 K), можно описать с помощью упрощённой блок-схемы, приведенной на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема программы I-V-T-Keysight для измерения ВАХ в диапазоне температур

С использованием разработанного ПО I-V-T-Keysight был проведен ряд экспериментов. Исследовались алмазные пластины, выращенные методом градиента температур. На образец 1 наносились омические и шоттковские контакты. Измеренные сопротивления между омическими контактами составили порядка 1 МОм. Были проведены измерения ВАХ и расчет R между омическими контактами образца во всем доступном диапазоне температур. Интересно, что в ходе измерений, Keysight B2901A смог неоднократно зафиксировать ток порядка десятой доли наноампера. Полученная зависимость R-T позволила определить наличие примесного уровня с энергией активации 370 мэВ.

*Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2024-0005 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-00)*

### Список литературы

1. Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges/ J. Y. Tsao, S. Chowdhury, M. A. Hollis et. al// Advanced Electronic Material. – 2017. – P. 83
2. О.В. Кучерова, В.И. Зубков, Е.О. Цвелев, И.Н. Яковлев, А.В. Соломонов. Неразрушающая диагностика наногетероструктур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN методом температурной спектроскопии адмиттанса // Заводская лаборатория, 2010. – т. 76, № 3, с. 24-28
3. Agilent Technologies, Блок прецизионного источника-измерителя серии Agilent B2900. Руководство для пользователя. 2011

## ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМОМИГРАЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ Ga КРЕМНИЕВЫХ КАНАЛОВ

ЗАИЧЕНКО А.Н., СТЕПЧЕНКО А.Д., ЗИНЕНКО М.Б.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова*

**Аннотация.** Воспроизводимость и стабильность процесса термомиграции определяется заданием массива зон на поверхности кремниевой пластины. В работе рассмотрена методика формирования массива дискретных зон на основе галлия с помощью избирательного смачивания. Предложена схема технологического оборудования формирования галлиевого порошка. Показаны результаты исследования электрофизических свойств легированных каналов, получаемых предложенным способом.

*Ключевые слова:* Термомиграция, легирование, галлий, жидкие зоны

Создание методом термомиграции (ТМ) [1] вертикальных  $p$ -каналов в монокристаллических пластинах кремния имеет ряд неоспоримых преимуществ. К ним нужно отнести постоянную (в отличие от диффузии) концентрацию легирующей примеси по глубине канала, малое время процесса ТМ, резкость  $p$ - $n$  перехода на границах канала [2]. Особенности процесса ТМ позволяют его применить при производстве как силовых приборов, так и элементов микроэлектроники.

Условия формирования локальных жидких зон на поверхности кремниевой пластины во многом определяют воспроизводимость и стабильность процесса ТМ. Высокие значения этих характеристик достигаются применением избирательного смачивания кремниевой пластины жидкой лигатурой [3] и вакуумного специализированного оборудования – формователя локальных жидких зон [4]. В процессе избирательного смачивания предварительно окисленные кремниевые подложки со вскрытыми по заданной топологии окнами протягиваются в формователе под тиглем с лигатурой, находящейся в жидком состоянии. При движении пластины происходит локальный контакт лигатуры с кремнием, его растворение и образование равновесного по температуре расплава кремния с лигатурой. Объем расплава, а, следовательно, и глубина локальной зоны, пропорциональны времени контакта лигатуры с кремнием.

Использование в описанном процессе в качестве лигатуры алюминия позволяет достичь концентрации акцепторов до  $2,0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В [3] было показано, что диапазон концентрации акцепторов примеси в ТМ каналах может быть расширен за счет использования в качестве лигатуры атомов галлия. Однако, галлий имеет существенно более низкую температуру плавления, его растворимость кремния вплоть до температуры 1400 К в несколько раз ниже. Указанные свойства галлия и его взаимодействие с атомами кремния деструктивно влияют на стабильности процесса ТМ и вынуждают поиск путей модификации процесса формирования локальных зон галлия.

Целью данной работы ставилась усовершенствование процесса получения в монокристаллической пластине кремния легированного галлием массива  $p$ -каналов.

Для формирования кремниевых каналов, легированных галлием, использован его высокодисперсный порошок в совокупности с углублениями, предварительно вытравленным в пластине. Такой порошок получали впрыскиванием расплава галлия (при температуре 320–370 К) на водоохлаждаемую изложницу (рис.1).

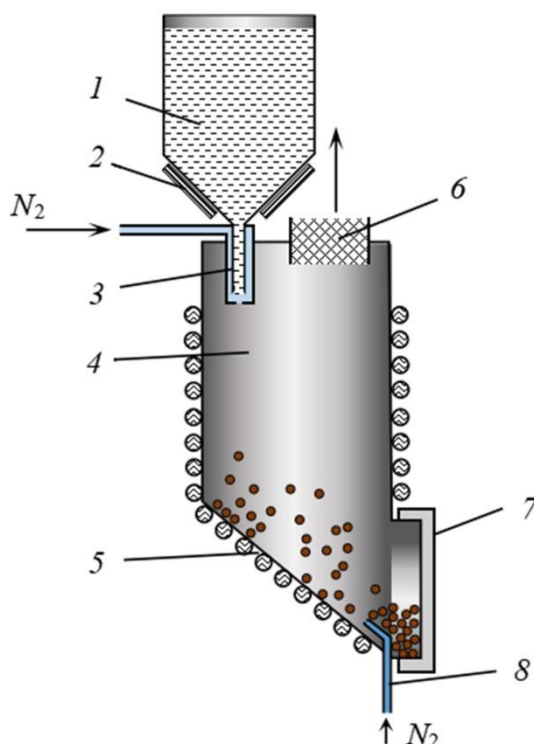


Рис.1. Схема формователя порошкообразного галлия. 1 – загрузочный контейнер с расплавом галлия; 2 – резистивные нагреватели; 3 – распылительное сопло; 4 – рабочая колонна; 5 – водоохлаждаемая изложница; 6 – выпускной фильтр; 7 – окно выгрузки порошка; 8 – тормозное сопло

Распыление галлия производили, включая и выключая подачу азота. Одновременно включали подачу встречного потока газа, для возникновения турбулентного потока, тормозящего и дополнительно охлаждающего распыленные микрокапли. Затвердевшие частицы оседали на водоохлаждаемых стенках изложницы. Отработанный газ удаляли через выпускной фильтр. По завершению процесса полученный порошок извлекали и калибровали, просеивая под действием ультразвука через набор сит. Размер частиц, получаемых таким способом, определялся размером сопла, температурой и давлением газа.

Порошок галлия загружали в тигель и устанавливали его в устройство перемещения под ним кремниевой пластины, предварительно защитной оксидным покрытием, со вскрытыми окнами необходимой топологии и созданным кислотным травлением углублениям. Во время протягивания пластин под тиглем порошок галлия попадал в углубления пластины. Затем пластина с порошком транспортировалась с нагревательный узел, котором порошок плавился, заполняя углубления расплавом. Плавление предназначено для «закрепления» галлия в углублениях пластины кремния и облегчения старта термомиграции.

Отработка технологии формирования галлиевых зон проводилось на пластинах Si(111) *n*-типа с удельным сопротивлением 4,5 Ом·см. В качестве защитного покрытия использовался термический окисел кремния толщиной 1 мкм. Сформированные химическим травлением пластин углубления в виде параллельных полос шагом 3 мм имели ширину в диапазоне 50–100 мкм и глубиной 50 мкм. Процессы заполнения углублений порошком галлия и его плавление проводился в вакууме при температуре в диапазоне 280–300 К. В дальнейшем пластину переносили в установку термомиграции, в которой при температуре в диапазоне 1400–1500 К локальные зоны выводили сквозь

пластину на ее тыльную сторону. В качестве порошка использовался галлий Ga<sub>5</sub>N в виде шариков диаметром 5–50 мкм. Диаметр шариков определялся подбором сечения экструдера, его температуры и давления впрыска расплава.

Скорость протягивания тигля над пластиной также оказывает заметное влияние на выход  $P$  годных. Для обеспечения  $P$ , большего 0,95, достаточно иметь: температуру процесса формирования – в диапазоне от 290 до 295°C; скорость движения тигля – от 0,2 до 0,3 м/с.

Проведены экспериментальные исследования электрофизических свойств полученных вертикальных  $p$ -каналов Si(Ga). Установлено, что их удельное сопротивление составляет величину от 0,01 до 0,02 Ом·см и убывает в этом диапазоне пропорционально концентрации примеси в канале и отношению ширины канала к его длине. Барьерная электроемкость примыкающих к ним  $p$ - $n$  переходов оценена значением в диапазоне от 10 до 100 пФ.

### Список литературы:

1. Лозовский, В.Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов. В.Н. Лозовский, Л.С. Лунин, В.П. Попов. М.: Металлургия, 1987. 232 с
2. Термомиграционные  $p$ -каналы: реальная структура и электрические свойства / Лозовский В. Н., Ломов А. А., Середин Б. М., Симакин С. Г., Заиченко А. Н., Середина М. Б. // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 29-38.
3. Формирование и структура термомиграционных кремниевых каналов, легированных Ga / А. А. Ломов, Б. М. Середин, А. Н. Заиченко // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 467–474;
4. Оборудование для получения кремниевых структур методом термомиграции. В.Н. Лозовский, Б.М. Середин, А.С. Полухин, А.И. Солодовник. //Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2015. –№5 (239). – 65-76.

## ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ P<sub>3</sub>НТ:РСВМ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Зорин И.А, Павлова М.Д., Хоршев Н.А., Ламкин И.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния состава активного слоя органической фоточувствительной структуры с объемным гетеропереходом на основе смеси P<sub>3</sub>НТ:РСВМ на спектральные характеристики, а именно спектры коэффициента поглощения и фоточувствительности. Для исследования влияния донорной и акцепторной компоненты были созданы образцы с разным соотношением масс P<sub>3</sub>НТ и РСВМ. Было установлено, что увеличение концентрации донора до 25:1 приводит к смещению пика коэффициента поглощения в длинноволновую область на 17 нм, в то время как увеличение доли акцептора до 1:25 наоборот сдвигает положение максимума на 27 нм в коротковолновую область. Спектры фоточувствительности подтверждают полученные результаты, а также демонстрируют, что P<sub>3</sub>НТ вносит вклад в образование длинноволнового плеча на спектрах фоточувствительности и поглощения.

*Ключевые слова:* органические фоточувствительные структуры, P<sub>3</sub>НТ, РСВМ, спектральные характеристики, центрифугирование.

*Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2022-0016.*

Активное изучение методов создания и свойств фоточувствительных структур на основе органических материалов обусловлено целым рядом факторов, например, возможностью модификации электрофизических и оптических свойств материала активного слоя. Современные химические методы синтеза позволяют регулировать

ширину запрещенной зоны, управлять переносом носителей заряда и увеличить их подвижность. Кроме того, органические фоточувствительные структуры обладают гибкостью, меньшей себестоимостью и простой технологией создания по сравнению с неорганическими аналогами.

Основные свойства органических фоточувствительных структур (ОФС) определяются составом их активного слоя, который представляет собой сочетание донорного и акцепторного материалов. Они должны обеспечить высокий показатель поглощения излучения, который обеспечивает генерацию электронно-дырочных пар, и эффективное разделение носителей заряда на донорно-акцепторном гетеропереходе (диссоциация экситонов) с последующим переносом носителей заряда к соответствующим электродам, что и формирует полезный сигнал.

В ходе эксперимента методом центрифугирования были созданы ОФС с различной долей донорной и акцепторной компонент активного слоя. В качестве донора был выбран поли(3-гексилтиофен) (P<sub>3</sub>HT), а в роли акцептора была использована производная фуллерена – [6,6]-фенил-С61-метиловый эфир масляной кислоты (PCBM), которые совместно растворялись в общем объеме хлорбензола, что позволило создать образцы, активный слой которых представляет собой объемный гетеропереход. Подготовленный раствор осаждался на стеклянные подложки, покрытые слоем прозрачного оксида олова, легированного фтором (FTO), являющегося анодом. Функции катода выполняет эвтектический сплав на основе галлия, индия и олова (GaInSn), локально наносимый поверх активного слоя. Зонная диаграмма исследуемых органических фоточувствительных структур представлена на рисунке 1.

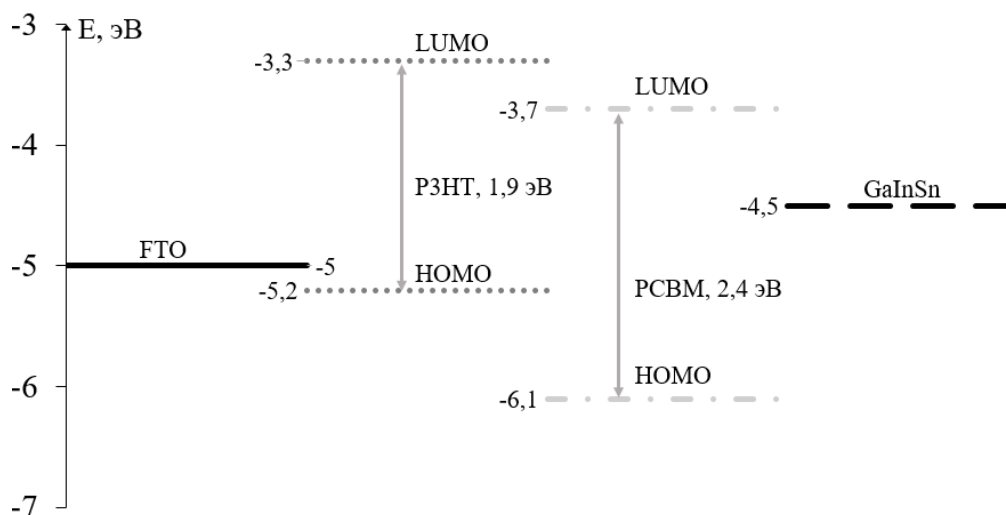


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры типа FTO/P<sub>3</sub>HT:PCBM/GaInSn

Для исследования влияния донорной и акцепторной компоненты на спектральные характеристики ОФС были созданы и исследованы образцы с разным составом активного слоя. Соотношение объема хлорбензола (растворителя) и массы растворяемого материала на протяжении всего эксперимента оставалось неизменным (в 1 мкл хлорбензола растворялся 1 мг донорно-акцепторной смеси материалов). За опорный был взят раствор, в котором концентрации донора и акцептора равны 1:1 (первое число обозначает долю донора, второе – акцептора). Изменяя соотношение масс донора и акцептора, были



подготовлены образцы с преобладанием донора 2:1 и 25:1. Аналогично были созданы структуры, в которых преобладает акцептор 1:2 и 1:25.

Для оценки поглощения излучения созданных образцов, проводилось исследование спектральных характеристик коэффициента поглощения при помощи спектрометра быстрого сканирования. Результаты исследования представлены на рисунке 2.

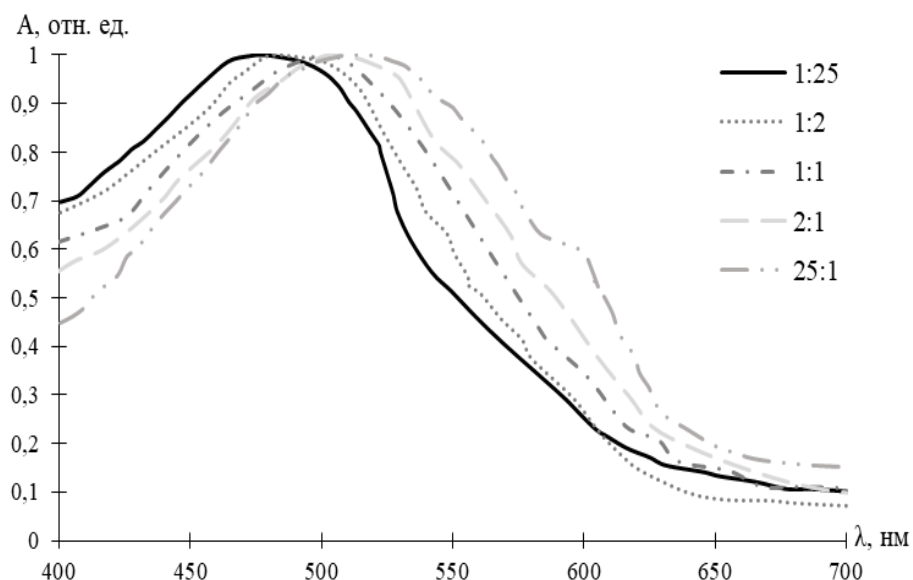


Рис. 2. Спектры коэффициента поглощения пленок P<sub>3</sub>HT:PCBM в различных соотношениях донора и акцептора

Для удобства отображения полученные данные были приведены в относительных единицах, в которых можно более наглядно проследить смещение положения максимумов в зависимости от концентрации P<sub>3</sub>HT и PCBM.

Пленки на основе смеси P<sub>3</sub>HT:PCBM обладают поглощением в диапазоне длин волн от 400 до 650 нм и имеют ярко выраженный пик, при этом его положение непосредственно зависит от соотношения донора и акцептора. В то же время изменение концентрации компонентов активного слоя влияет и на ход кривой. Так, если концентрации донора и акцептора равны (1:1), максимальное поглощение достигается на длине волны 505 нм. Проведенное исследование показывает, что с увеличением концентрации P<sub>3</sub>HT можно наблюдать смещение максимума спектра поглощения в длинноволновую область и значительный рост длинноволнового плеча, что наиболее ярко выражено в образцах с составом 25:1, для которых основной пик сместился на 12 нм и длина волны максимума составила 517 нм, а также отчетливо проявился второй пик на 610 нм. Для образцов с соотношением донора и акцептора 2:1 максимум поглощения приходится на 510 нм. С другой стороны, увеличение концентрации PCBM еще более значительно смещает спектр, но уже в коротковолновую область, так как образец с соотношением P<sub>3</sub>HT:PCBM 1:2 имеет пик поглощения на длине волны 483 нм. Для образцов с составом активного слоя 1:25 максимум поглощения приходится на 478 нм. При этом стоит отметить, что с увеличением концентрации акцептора уменьшается вклад длинноволнового плеча в спектр коэффициента поглощения.

Для более подробного изучения влияния концентрации донора и акцептора на свойства органической структуры на основе P<sub>3</sub>HT:PCBM были исследованы спектры фоточувствительности. Измерения спектров проводились при помощи дифракционного



решеточного монохроматора и системы синхронного детектирования. Результаты исследования представлены на рисунке 3.

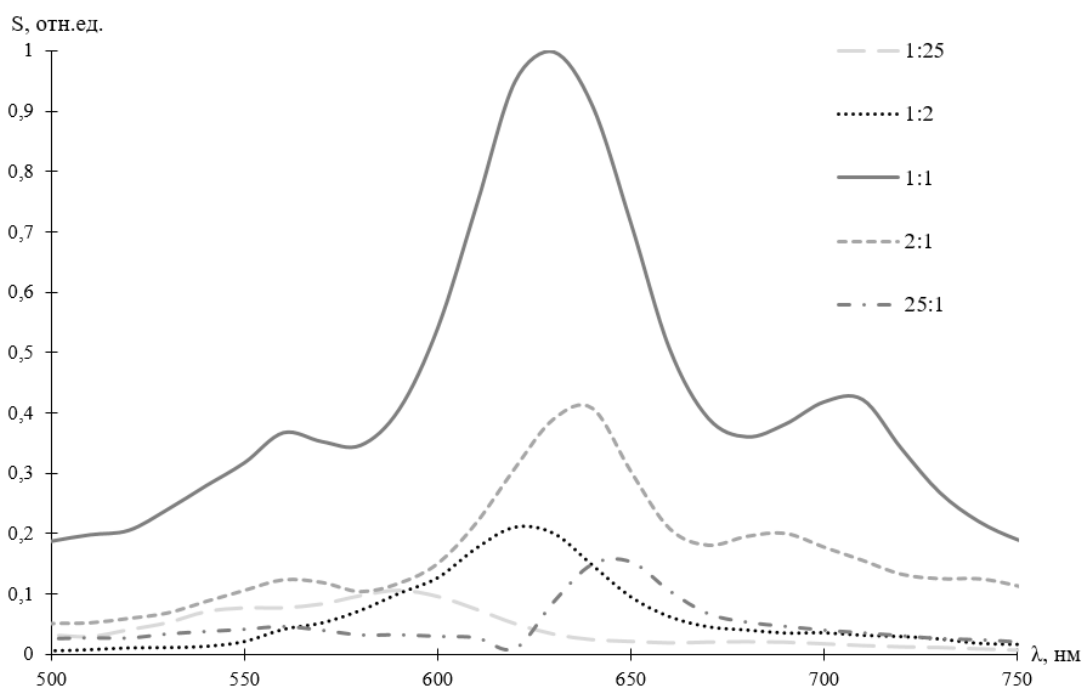


Рис. 3. Спектры фоточувствительности структур FTO/P<sub>3</sub>HT:PCBM/GaInSn в различных соотношениях донора и акцептора

Для анализа эффективности созданных структур результаты были представлены в относительных единицах, где максимальным значением является фоточувствительность структуры с одинаковой концентрацией донора и акцептора (1:1). Спектр фоточувствительности для всех образцов находится в диапазоне длин волн от 500 до 750 нм, а ширина спектра на полувысоте для соотношения 1:1 составляет 70 нм. Исходя из результатов, наибольший сигнал наблюдается для образцов с соотношением донора и акцептора 1:1, при этом эффективность структуры при изменении концентрации материалов снижается достаточно резко. Однако, сравнивая зависимости 2:1 и 1:2, можно сделать вывод, что P<sub>3</sub>HT оказывает больший вклад в фототок, так как сигнал для образцов с соотношением 2:1, примерно, в 2 раза больше сигнала для образцов с соотношением донора и акцептора 1:2. Также стоит отметить, что тенденции смещения спектра, отмеченные для спектров поглощения, подтверждаются и на спектрах фоточувствительности. Так, пик для образцов с составом 1:1 находится на длине волны 630 нм, что соответствует электронным переходам в P<sub>3</sub>HT, в то время как увеличение концентрации донора приводит к смещению пика на 640 нм при соотношении 2:1 и на 650 нм при соотношении 25:1. И наоборот, увеличение концентрации акцептора до 1:2 смещает максимум на 620 нм. Также подтверждается вклад донора в длинноволновую область спектра фоточувствительности, так как при соотношении 2:1 спектр имеет ярко выраженное плечо на длине волны 690 нм, в то время как на спектре 1:2 оно значительно уменьшается.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования влияния концентрации донорной и акцепторной компоненты активного слоя фоточувствительной структуры с объемным гетеропереходом на примере структуры FTO/P<sub>3</sub>HT:PCBM/GaInSn.

Было установлено, что Р<sub>3</sub>НТ вносит вклад в смещение в длинноволновую область спектра, так как при увеличении концентрации донора до 25:1, максимум поглощения сместился на 12 нм, а максимум фоточувствительности на 20 нм, относительно структуры с концентраций донора и акцептора 1:1. Также данный материал характеризует дополнительное длинноволновое плечо фоточувствительной структуры, которое проявляется даже при соотношении 1:1 на длине волны 710 нм, что может обуславливаться сильными внутрицепочными взаимодействиями в Р<sub>3</sub>НТ. В то же время влияние РСВМ заключается в смещении спектра в коротковолновую область, так как при увеличении концентрации акцептора до соотношения 1:25, длина волны максимума спектра коэффициента поглощения сместилась на 27 нм. Несмотря на то, что наибольшую эффективность имеет структура с одинаковыми концентрациями донора и акцептора, изменение количества материалов позволяет непосредственно влиять на спектральные характеристики органической фоточувствительной структуры.

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ДИСУЛЬФИДАТ ВОЛЬФРАМА

ЗЫРЯНОВА О.Д., НАЛИМОВА С.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Исследованы наноструктуры дисульфида вольфрама WS<sub>2</sub>, способные к детектированию паров изопропилового спирта, этанола и ацетона при комнатной температуре. Наноструктуры были получены с помощью гидротермального синтеза. Для исследования рельефа полученной структуры была использована растровая электронная микроскопия. Газочувствительный отклик синтезированного дисульфида вольфрама исследован при температуре 22 – 25 °С и концентрации 1000 ppm для паров изопропилового спирта и этанола и 2000 ppm для паров ацетона. Установлено, что время отклика и время восстановления уменьшилось при облучении образца УФ-излучением.

*Ключевые слова:* дисульфид вольфрама, гидротермальный синтез, газовая сенсорика

Дисульфид вольфрама WS<sub>2</sub> – полупроводник, который может использоваться в газоаналитических приборах [1], полевых транзисторах [2], солнечных элементах [3], светодиодах [4], нейроморфных устройствах [5] и биосенсорах [6].

Применение WS<sub>2</sub> в этих областях возможно благодаря развитой удельной поверхности, наличию активных центров адсорбции (дефекты серы и вакансии), непрямозонной структуре с шириной запрещенной зоны E<sub>g</sub>=1,3-1,4 эВ для объемного слоя и прямозонной структуре с шириной запрещенной зоны E<sub>g</sub>=1,8-2,1 эВ для монослоя, умеренно высокой подвижности носителей заряда  $\mu = 1103 \frac{\text{м}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$ , зависящей от легирования и размера наноструктур [7]. Важно отметить, что переход от непрямозонного полупроводника к прямозонному возможен при уменьшении числа слоев, что позволяет легко регулировать свойства материала. Дисульфид вольфрама может поглощать около 10% света в видимом диапазоне, его коэффициент поглощения  $1,5 * 10^6 \text{ см}^{-1}$ , что может позволить использовать его в оптоэлектронных устройствах, например, фотоприемниках и светоизлучающих устройствах [8].

Дисульфид вольфрама может проявлять как полупроводниковые, так и металлические свойства в зависимости от координации атомов серы вокруг атома вольфрама [9]. Если

дисульфид вольфрама находится в тригонально-призматической координации, то он обладает полупроводниковыми свойствами. Если же структура  $WS_2$  октаэдрическая, то он проявляет металлические свойства – высокую проводимость и каталитическую активность, однако данная форма менее стабильна.

В данной работе исследованы газочувствительные свойства наноструктур дисульфида вольфрама, полученных методом гидротермального синтеза. Рассматриваемые в работе наноструктуры дисульфида вольфрама были получены с помощью гидротермального синтеза, описанного в работе [10]. 2,5 ммоль вольфрамата натрия  $Na_2WO_3 \cdot 2H_2O$  растворяли в 80 мл дистиллированной воды с использованием магнитной мешалки. Затем кислотность раствора изменяли до  $pH=3$  путем добавления раствора  $HCl$  с концентрацией 2 моль/л (примерно 4 мл). В полученный раствор добавляли 7,5 ммоль L-цистеина и продолжали перемешивать, пока раствор не становился прозрачным и не растворились все компоненты. После этого раствор помещали в автоклав вместе с подложками и выдерживали при температуре  $200^\circ C$  в течение 24 часов, а затем охлаждали до комнатной температуры естественным путём. Образовавшийся в результате синтеза осадок отделяли центрифугированием и промывали дистиллированной водой, а затем сушили при  $75^\circ C$ .

Сенсорные свойства синтезированных структур были исследованы с помощью стенда газочувствительности, который представляет собой герметичную камеру, в которую помещается образец и попеременно подается осушенный воздух и воздух с заданной концентрацией исследуемого газа [11-13]. Были проведены измерения газочувствительных свойств дисульфида вольфрама к парам этанола и изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm и ацетона с концентрацией 2000 ppm при температуре  $22 - 25^\circ C$ . Кроме того, сенсорные свойства были исследованы при облучении образца УФ-светодиодом ( $\lambda_{пик} \approx 370$  нм,  $P_{потр} = 1$  Вт) с интенсивностью, которая регулировалась коэффициентом заполнения импульсов ( $D=1$ ), при тех же концентрациях паров. Чувствительность сенсора  $S$  к детектируемому газу определяется, как отношение сопротивления в атмосфере воздуха к сопротивлению при наличии детектируемого газа.

Продемонстрировано, что чувствительность образца при использовании УФ-облучения возрастает к парам изопропилового спирта и этанола, для паров ацетона роста чувствительности при воздействии на образец УФ-излучения не наблюдается. Время отклика и восстановления образца, на который воздействуют парами изопропилового спирта и УФ-излучением, уменьшилось примерно в три раза по сравнению с образцом, не облучаемым ультрафиолетом, при одинаковой концентрации паров и рабочей температуре. В случае, когда образец облучают УФ-излучением при воздействии на него паров этанола, уменьшение характеристик сенсора незначительно, при использовании ацетона в качестве газа-анализатора время отклика и восстановления одинаково. Важно отметить, что использование УФ-излучения приводит к улучшению восстановления сопротивления чувствительных слоев. УФ-светодиод с пиковой длиной волны 370 нм ( $E=3,35$  эВ) при облучении наноструктуры дисульфида вольфрама, который имеет ширину запрещенной зоны  $E_g=1,3-1,4$  эВ, генерирует неравновесные носители заряда, следовательно, способствует росту концентрации ионов кислорода, которые адсорбируются на поверхности полупроводника. Таким образом, каталитическая активность поверхности увеличивается, что положительно влияет на отклик газоаналитического сенсора.

Наноструктуры  $WS_2$ , синтезированные в работе, продемонстрировали отклик к парам изопропилового спирта, этанола и ацетона при температуре  $22 - 25^\circ C$ , что упрощает

использование данного материала в качестве твердотельного газового сенсора в газоаналитических приборах. Экспериментально установлено, что воздействие на образец УФ-излучения положительно влияет на сенсорный отклик к парам этанола и в меньшей степени к парам изопропилового спирта. Рост чувствительности структуры обусловлен генерацией неравновесных носителей заряда, которые являются адсорбционными центрами на поверхности полупроводника.

### Список литературы

1. Tang, H.; Li, Y.; Sokolovskij, R.; Sacco, L.; Zheng, H.; Ye, H.; Yu, H.; Fan, X.; Tian, H.; Ren, T.-L.; et al. Ultra-high sensitive NO<sub>2</sub> gas sensor based on tunable polarity transport in CVD-WS<sub>2</sub>/IGZO p-N heterojunction. ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 40850–40859.
2. Sebastian, A.; Pendurthi, R.; Choudhury, T.H.; Redwing, J.M.; Das, S. Benchmarking monolayer MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> field-effect transistors. Nat. Commun. 2021, 12, 693.
3. Rafiq, M.K.S.B.; Amin, N.; Alharbi, H.F.; Luqman, M.; Ayob, A.; Alharthi, Y.S.; Alharthi, N.H.; Bais, B.; Akhtaruzzaman, M. WS<sub>2</sub> : A new window layer material for solar cell application. Sci. Rep. 2020, 10, 771.
4. Sheng, Y.; Chen, T.; Lu, Y.; Chang, R.-J.; Sinha, S.; Warner, J.H. High-performance WS<sub>2</sub> monolayer light emitting tunneling devices using 2D materials grown by chemical vapor deposition. ACS Nano 2019, 13, 4530–4537.
5. Yan, X.; Zhao, Q.; Chen, A.P.; Zhao, J.; Zhou, Z.; Wang, J.; Wang, H.; Zhang, L.; Li, X.; Xiao, Z.; et al. Vacancy-induced synaptic behavior in 2D WS<sub>2</sub> nanosheet-based memristor for low-power neuromorphic computing. Small 2019, 15, 1901423.
6. Zuo, X.; Dai, H.; Zhang, H.; Liu, J.; Ma, S.; Chen, X. A peptide-WS<sub>2</sub> nanosheet based biosensing platform for determination of  $\beta$ -secretase and screening of its inhibitors. Analyst. 2018. 143. 4585–4591
7. Bhattacharyya, P.; Acharyya, D. Impact of Device Configurations on Sensing Performance of WS<sub>2</sub>-Based Gas Sensors: A Review. IEEE sensors journal, 2021, 20
8. Bernardi, M.; Palumbo, M.; Grossman, J.C. Extraordinary sunlight absorption and one nanometer thick photovoltaics using two-dimensional monolayer materials. Nano Lett. 2013. 13 (8). 3664–3670
9. Халькогениды переходных металлов со слоистой структурой и особенности заполнения их бриллюэновой зоны/ Калихман В.Л., Уманский Я.С. // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. № 3. С. 503–528
10. Wu, Y.; Liu, Z.; Chen, J.; Cai, X.; Na, P. Hydrothermal fabrication of hyacinth flower-like WS<sub>2</sub> nanorods and their photocatalytic properties. Materials Letters. 2017. 189
11. Nalimova, S.S.; Ryabko, A.A.; Maximov, A.I.; Moshnikov, V.A. Light-activation of gas sensitive layers based on zinc oxide nanowires. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1697. 012128.
12. Ryabko, A.A.; Nalimova, S.S.; Maximov, A.I.; Moshnikov, V.A. Investigation of the gas sensitivity of nanostructured layers based on zinc oxide nanorods under ultraviolet irradiation Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. 1180–1183.
13. Anikina, M.A.; Ryabko, A.A.; Nalimova, S.S.; Maximov, A.I. Synthesis and study of zinc oxide nanorods for semiconductor adsorption gas sensors Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1851. 012010.

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ ПВДФ ПЛЕНОК МЕТОДОМ «ТРАНСФОРМАТОРА»

Исхакова Э.Р., Еманов Д.П., Моисеев К.М., Осипков А.С.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

**Аннотация.** В работе описан метод «трансформатора» для измерения пьезокоэффициентов сегнетоэлектрических пленок на основе ПВДФ. Определены требования к элементам стенда Рассмотрены этапы разработки и сборки экспериментального стенда для измерения пьезокоэффициентов  $d_{31}$  и  $d_{32}$ . Приведена финальная конструкция стенда, используемая на практике

для измерения пьезокоэффициентов ПВДФ пленок в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

*Ключевые слова: ПВДФ, прямой пьезоэффект, обратный пьезоэффект, пьезокоэффициенты*

## Введение

На сегодняшний день изучение сегнетоэлектрических материалов представляет большой интерес для научных исследований и практического применения в различных областях электротехники и электроники. Благодаря ряду уникальных свойств они могут применяться в конденсаторах, пьезоэлектрических преобразователях, фазовых преобразователях и других устройствах.

Одним из наиболее перспективных классов сегнетоэлектрических материалов являются поливинилиденфторид (ПВДФ) и его сополимеры. Их основная характеристика – пьезоэлектрический коэффициент, который описывает количество заряда, возникшего на единице поверхности материала при приложении к нему единицы давления [1].

Исследование свойств пьезоэлектрических полимерных материалов, таких как поливинилиденфторид (ПВДФ), а в частности, измерение его пьезокоэффициентов, является одним из ключевых этапов в процессе изготовления и изучения свойств этого материала. Во всех известных методиках пьезомодуль измеряется косвенно, его расчет не стандартизован, и нет строго определенной методики, по которой можно его точно определить. Одним из наиболее доступных является метод «трансформатора», который позволяет измерить в рамках лабораторных условий определить  $d_{31}$  и  $d_{32}$  [2].

Целью данной работы является разработка стенда для измерения пьезомодуля сегнетоэлектрических полимерных пленок ПВДФ методом «трансформатора».

## Метод «трансформатора»

В настоящее время в приборостроении широко используются методы измерений в динамическом режиме. Они основаны на измерении частотных характеристик в области резонанса и связаны с возбуждением упругих колебаний и распространением акустических волн. Динамические методы позволяют проводить комплексное изучение как пьезоэлектрических, так и механических свойств образцов: пьезокоэффициенты, упругие константы, коэффициенты электромеханической связи [3].

Метод «трансформатора» относится к динамическим методам измерения. Принцип работы данного метода заключается в работе измеряемого образца одновременно в режиме прямого и обратного пьезоэффекта. На рисунке 1 приведена общая схема измерения данным методом.

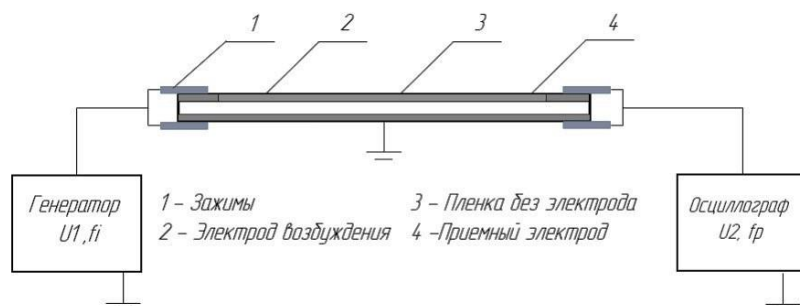


Рис. 1. Схема измерения пьезомодуля методом «трансформатора»

Образец для измерений должен иметь форму прямоугольной пластины. При измерении пьезомодуля  $d_{31}$  длинная сторона образца направлена вдоль оси ориентации, для измерения пьезомодуля  $d_{32}$  – перпендикулярно оси ориентации (рис. 2). Емкость образца предварительно измеряется на частоте 1 кГц [4].

При подаче электрического напряжения  $U1$  с генератора на электрод возбуждения в образце возникают продольные колебания по длине, возникновение которых обусловлено обратным пьезоэлектрическим эффектом. На приемном электроде из-за прямого пьезоэлектрического эффекта появляется напряжение  $U2$  той же частоты.

При поддержании постоянного значения входного напряжения и изменения частоты генератора в пределах заданного диапазона на резонансной частоте колебаний образца наблюдается максимум выходного напряжения  $U2$ , значение которого фиксируется на осциллографе [5].

### Разработка измерительного стенда

Для разработки стенда составлен перечень с необходимыми требованиями для каждого элемента схемы (таблица 1).

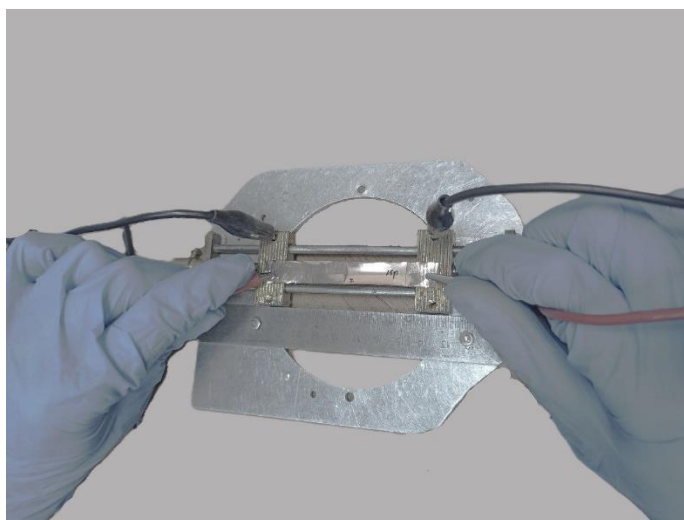
Таблица 1.

Компонент	Параметры
Зажимы для крепления образца	Изготавливаются на 3-D принтере
Генератор сигналов UTG9322	1 мВ ... 10 В 1 Гц ... 30 МГц
Осциллограф UNI-T UPO1102CS	100 МГц Максимальное входное напряжение: 400 В
LCR Meter: LCR – 816	0,00001 пФ ... 99999 мкФ 12 Гц ... 100 кГц Точность: 0,05%

Сборка стенда происходит в несколько этапов. Для измерений использовалась пленка PolyK. Перед началом каждого этапа пленка прозванивается при значениях напряжения 5 В и частоты от 8 до 15 кГц. Отсутствие звука означает, что сигнал на пленку не поступает, и необходимо обеспечить более плотный контакт.

На первых этапах измерения характеризуются большой погрешностью из-за человеческого фактора и наличие шумов в сигнале.

На 1-м этапе (рисунок 2) оснастка и нижний электрод заземляются с генератора зацеплением прижимов к самой оснастке. Пленка фиксируется вручную прижимами.



*Рис. 2. Стенд. 1-й этап*

На 2-м этапе (рисунок 3) зажимы скреплены между собой с каждой стороны для снижения человеческого фактора. Оснастка с пленкой помещены в алюминиевый экран для снижения шумов в сигнале.



*Рис. 3. Стенд. 2-й этап*

Для полной изоляции и подавления шумов в сигнале, а также для удобства проведения измерений спроектирована оснастка (рисунок 4). Оснастка состоит из нескольких стержней, на одном из которых нарезана резьба. На центральном стержне установлено 2 пластины, на которые помещается пленка ПВДФ. В них можно устанавливать пленки разной длины. Оснастка расположена в металлическом корпусе.

Корпус необходим для устранения различных шумов при измерениях. В нем сделаны разъемы для подключения к генератору сигналов и осциллографу. На корпус сверху надевается крышка для полной изоляции, прикручивается к корпусу с помощью винтов.

Крепежи для оснастки спроектированы, а затем распечатаны на 3д принтере из пластика. Благодаря им осуществляется равномерный прижим пленки с двух концов. Зажим происходит с помощью винтов.

В такой конструкции сигнал получен полностью чистым, без шумов.

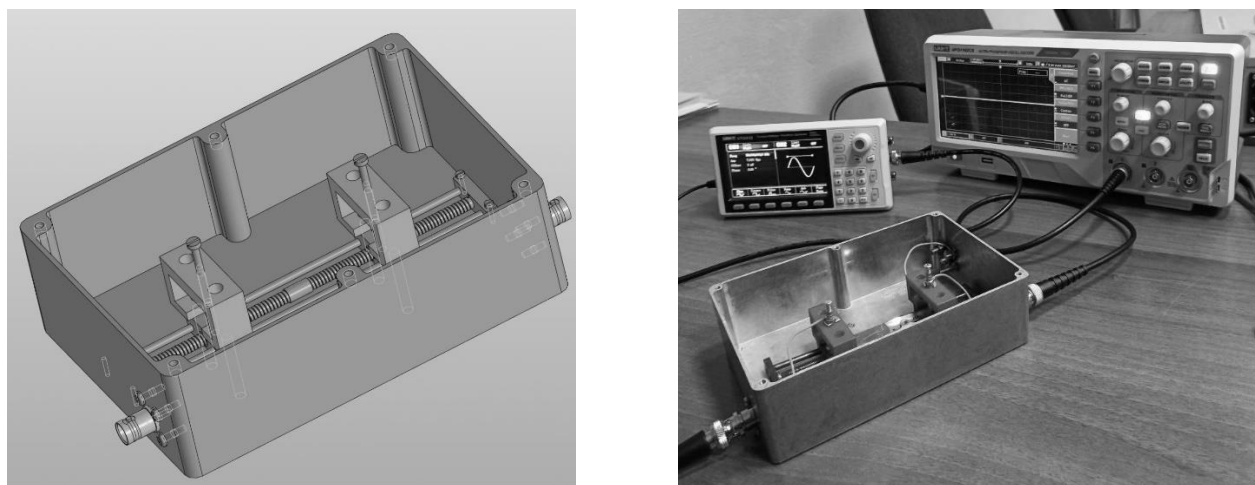


Рис. 4. Измерительный стенд

### Заключение

В рамках проделанной работы разработан и собран стенд для измерения пьезокоэффициентов сегнетоэлектрических пленок на основе ПВДФ методом «трансформатора». Разработанный измерительный стенд, позволяет снимать сигнал без шумов и с низкой погрешностью, возникающей из-за человеческого фактора. Стенд успешно используется в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана для определения пьезокоэффициентов  $d_{31}$  и  $d_{32}$  ПВДФ пленок.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2022-0007).

### Список литературы

1. Kepler R.G., Anderson R.A. «Ferroelectric polymer». Advance in Physics 41.1 (1992). – P. 1-57.
2. Акопьян В.А. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов / В.А. Акопьян, А.Н. Соловьев, С.Н. Швецов. – Изд-во ЮФУ, 2008. – С. 144.
3. Старченко И.Б., Вишневикий В.Ю. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Измерительные преобразователи и электроды». Часть 1: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 44 с. УДК 539.1.078: 629.12(031).
4. Cady W. Piezoelectricity and its practical application: Textbook. – М.: Foreign Literature Publishing House, (1949). – P. 721.
5. Rezvani B., Linvill J.G. «Measurement of piezoelectric parameters versus bias field strength in polyvinylidene fluoride (PVF2)». Applied Physics Letters 34.12, 1979. P. 828-830.



## СТЕНД В ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВАХ АКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

КАСАПИДИ Г.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе представлен разработанный лабораторный стенд для измерения вольт-амперных характеристик полупроводникового прибора при изменении температуры. Для тестирования линейки из пяти различных полупроводниковых диодов в измерительной схеме используется микросхема – аналоговый ключ ADG252, а температура исследуемого элемента контролируется с помощью термоэлектрического модуля. Также представлено описание программы управления лабораторным стендом, выполненной в ПО LabVIEW.

*Ключевые слова:* лабораторный стенд, NI ELVIS, температурные измерения, вольт-амперные характеристики, экспресс-диагностика

В настоящее время создается огромное количество новых приборов электронной компонентной базы, вместе с этим появляется необходимость в экспресс-диагностике их параметров, важнейшим из которых является вольт-амперная характеристика (ВАХ) [1]. В данной работе для измерения ВАХ в качестве основного прибора был выбран NI ELVIS – многофункциональная система, предназначенная для тестирования электрических схем различного применения.

Аппаратная часть комплекса NI ELVIS состоит из рабочей станции и макетной платы. Плата ввода/вывода DAQ и рабочая станция вместе образуют законченную лабораторную установку в стандартной комплектации.

Макетная плата предназначена для монтажа электронных схем. Имеет разъемы BANANA и BNC. Макетная плата — съемная, что позволяет менять тип проводимой лабораторной работы, просто сменив макетную плату с уже собранной на ней схемой.

Измерения параметров (разности потенциалов) схемы, собранной на макетной плате NI ELVIS можно проводить по физическому каналу, или же путем создания глобального виртуального канала (global virtual channel) в программе конфигураторе “Measurement and Automation Explorer” [2].

Самым доступным способом измерения ВАХ является подключение двухполюсника к любому прибору — анализатору ВАХ. Например, можно использовать поставляемый вместе с комплексом NI ELVIS виртуальный прибор «анализатор ВАХ», однако данный прибор нельзя модифицировать. Так как его функциональность ограничена только измерением ВАХ одного двухполюсника при комнатной температуре, было принято решение разработать собственную измерительную схему и надстройку, позволяющую производить измерения в диапазоне температур, а также автоматизировать установку с помощью программы, написанной в среде графического программирования LabVIEW.

Для демонстрации концепции и устройства лабораторной установки в данной работе реализованы измерения вольт-амперных характеристик пяти полупроводниковых диодов, включая температурные зависимости.

Температурный режим измерений обеспечивает надстройка, которая состоит из термоэлектрического модуля коммерческой серии TEC-12706 и радиатора (рисунок 1). Преимущество выбора данных устройств заключается в том, что в зависимости от

полярности приложенного напряжения поверхность, на которой находится исследуемый прибор, может как нагреваться, так и охлаждаться в определенном диапазоне температур. Радиатор установлен для отведения тепла в случае, когда исследование проходит в режиме охлаждения прибора. В качестве датчика температуры выступает терморезистор, смонтированный на плату с объектом измерений.

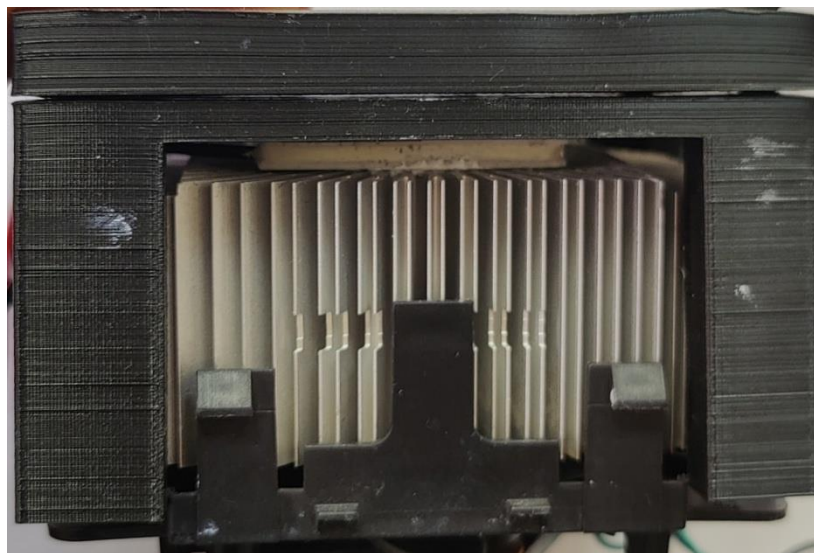


Рис.1. Устройство системы нагрева (охлаждения)

Главной задачей при создании измерительной схемы (рисунок 2) была реализация измерений ВАХ сразу нескольких диодов на одной макетной плате. Для этого диоды в схеме включаются каждый в свой последовательный контур с общим шунтирующим резистором, переключение между которыми обеспечивается аналоговым коммутатором с цифровыми входами ADG252. На схеме также изображен блок с температурными измерениями ВАХ кремниевого диода. Выбор объекта измерений осуществляется установкой «1» на линии цифрового вывода макетной платы NI ELVIS, в установке задействованы 6 цифровых каналов.

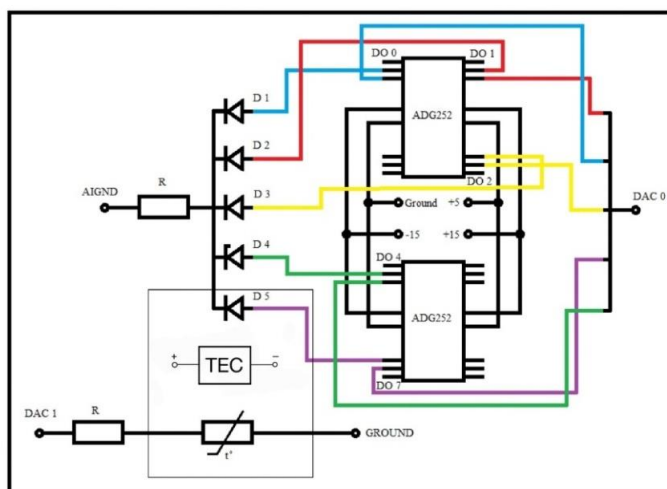


Рис.2. Иллюстрация принципиальной схемы измерений

Между аналоговым выходом DAC0 и заземлением AIGND устанавливается значение разности потенциалов. Затем измеряется падение напряжения на резисторе. Замер падения напряжения ведется по двум каналам в режиме работы «дифференциальный». То есть измеряется значение потенциала в двух точках, затем, одно значение вычитается из другого. Через падение напряжения на постоянном резисторе рассчитывается ток, протекающий в цепи. Вычитанием из значения напряжения, установленного между точками DAC0 и AIGND, значения падения напряжения на шунтирующем резисторе, получается значение напряжения на исследуемом диоде (или любом другом двухполюснике).

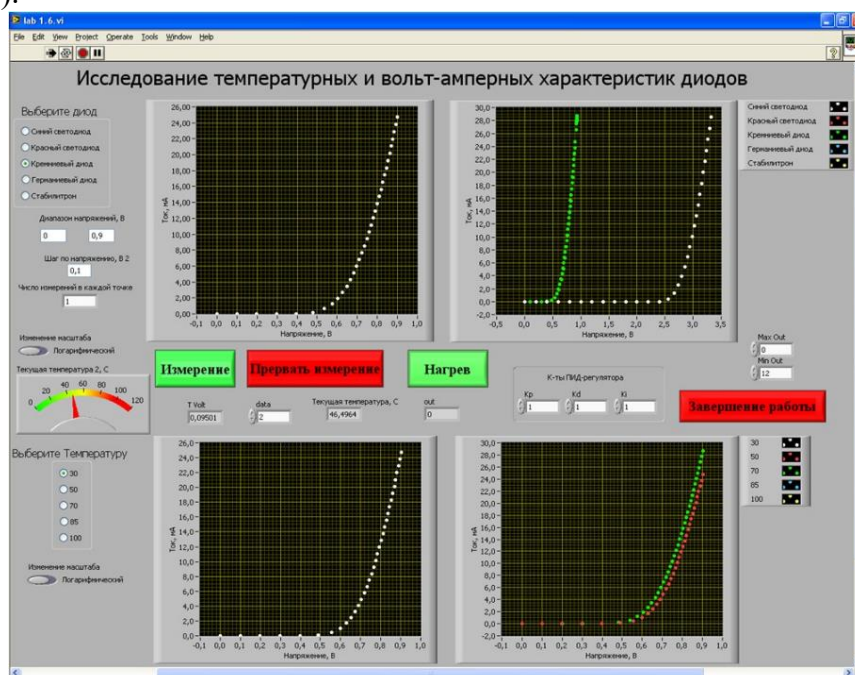


Рис.3. Лицевая панель прибора измерения ВАХ полупроводниковых диодов

Автоматизированный процесс измерения осуществляется с помощью программы, позволяющей управлять установкой в рамках одного пользовательского интерфейса: электрические измерения, коммутация контуров, вывод графиков с результатами измерений на экран и контроль температуры, осуществляемый с помощью ПИД-регулятора. Лицевая панель программы представлена на рисунке 3.

Большим преимуществом лабораторного стенда является возможность сравнить и проанализировать большое количество характеристик исследуемого прибора на основе экспериментальных данных и расчета в разработанном ПО. К примеру, с помощью численного дифференцирования экспериментальной ВАХ [4] в одной программе можно оценить дифференциальное сопротивление диода, сэкономив тем самым время на обработку экспериментальных данных.

Помимо представленных вольт-амперных характеристик на постоянном токе, есть возможность реализовать воздействие на образцы переменным сигналом и получить качественные температурные и частотные измерения, а также охватить широкий спектр других электрических характеристик образцов.

Разработанный лабораторный стенд значительно расширил возможности NI ELVIS, сделал эксперимент более эффективным и информативным, при этом сохранил компактность и изящность исходной установки. Богатый инструментарий LabVIEW

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

позволяет охватить более широкий круг задач и характеристик, которые можно определить, что особенно важно при исследовании и экспресс-диагностике приборов ЭКБ, поскольку качественное описание физических принципов работы возможно лишь при рассмотрении большого числа параметров в комплексе.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2024-0005 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-00).

### Список литературы

1. Физика полупроводниковых приборов. / Зи С. // М.: Физматлит, 2015. - 544 с.
2. NI ELVIS User Manual – 2006. – 96 p.
3. LabVIEW User Manual – 2007. – 370 p.
4. Компьютерные технологии в научных исследованиях: Учеб. пособие. / Зубков В. И., Соломонов А. В. / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ” - 2006. - 88 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

КОСОГОРОВА Т.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Разработанная программа производит расчет интегральной интенсивности излучения для оптоэлектронных устройств, использующих дифракционные отражательные решетки с треугольным профилем штриха. Пользователь может изменять характеристики ДР (размеры самой решетки, количество штрихов на мм, размеры штриха) и падающего излучения (углы падения в плоскости дифрагирования и вне её, длину волны). К приборным параметрам относятся угол падения и длина волны. Построение спектральных характеристик излучения в зависимости от длины волны для конкретной дифракционной решетки позволяют однозначно определить рабочие характеристики приборной установки.

*Ключевые слова:* дифракционная отражательная решетка, треугольный профиль штриха, решетка типа эшелетт, спектральные характеристики

Актуальность исследования дифракционных решеток (ДР) обусловлена большой областью их применения: они находят применение в интерферометрии и спектральных исследованиях, применяются в волоконно-оптическом приборостроении в качестве чувствительных элементов различных датчиков физических параметров и систем мониторинга. С развитием спектрального приборостроения актуализируется вопрос создания светосильных приборов с высоким разрешением и широким спектральным диапазоном на основе ДР.

Спектр применения ДР постоянно расширяется, практически значимой и актуальной остается задача о моделировании спектральных характеристик при изменении параметров ДР и падающего излучения, для чего было разработано программное обеспечение.

В данном программном обеспечении возможно моделирование спектральных характеристик оптоэлектронных приборов с дифракционной отражательной решеткой с треугольным профилем штриха (см. рисунок 1).

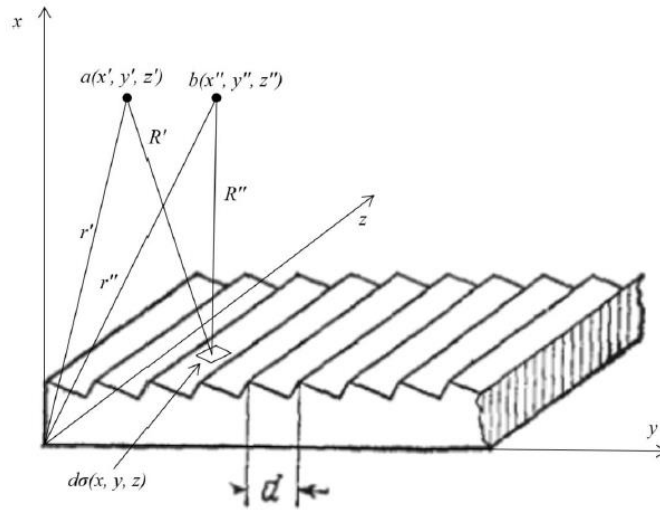


Рис. 1. Дифракционная решетка с треугольным профилем штриха

В соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля [1] каждый элемент поверхности решетки  $d\sigma(x, y, z)$  излучает вторичную сферическую волну. В точке  $b(x'', y'', z'')$  эту волну можно представить в следующем виде:

$$dE(x'', y'', z'') = \rho E_0 d\sigma e^{i(\omega t - k(R' + R''))} / R'R''$$

где  $\rho$  – коэффициент отражения элемента поверхности решетки.

Амплитуда световых колебаний в точке с координатами  $(x'', y'', z'')$  определяется как совокупность вторичных волн, приходящих в данную точку пространства от всех точек дифракционной решетки с учетом их фаз и амплитуд.

Если считать, что решетка имеет строгую периодичность вдоль оси  $y$ , то интегрирование по всему профилю решетки можно описать с помощью интегрирования по профилю одного штриха. Пусть  $z_0$  – длина штриха вдоль оси  $z$ ,  $n$  – число штрихов, тогда интенсивность в точке наблюдения равна:

$$J = EE^* = E_0' z_0^2 (\sin u/u)^2 (\sin n\nu/\nu)^2 \left[ \int_{\Lambda} e^{ik(x\delta + y\mu + z\nu)} dl \right] \cdot \left[ \int_{\Lambda} e^{-ik(x\delta + y\mu + z\nu)} dl \right] = J_{z_0} J_n J_{\Lambda} \quad (1)$$

где  $E_0' = \rho E_0 / R'R''$ ,  $u = k z_0 \nu / 2$ ,  $\nu = kd\mu/2$ ,  $J_{\Lambda}$  – интеграл по профилю одного штриха,  $J_n$  – функция, обусловленная интерференцией  $n$  когерентных пучков, идущих в точку наблюдения от штрихов решетки,  $J_{z_0}$  – функция, введенная для обозначения умножения первых трех членов выражения (1).

Коэффициенты  $\delta$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  из соотношения (1) определяются косинусами углов между  $r'$ ,  $r''$  и их проекциями на оси координат по соотношениям (2) в соответствии со схемой дифрагирования (рисунок 2):

$$\begin{aligned} \delta &= \cos \theta' \cdot \cos \Psi + \cos \theta'' \cdot \cos \varphi, \\ \mu &= \cos \theta' \cdot \sin \Psi + \cos \theta'' \cdot \sin \varphi, \\ \nu &= \sin \theta' + \sin \theta'' \end{aligned} \quad (2)$$

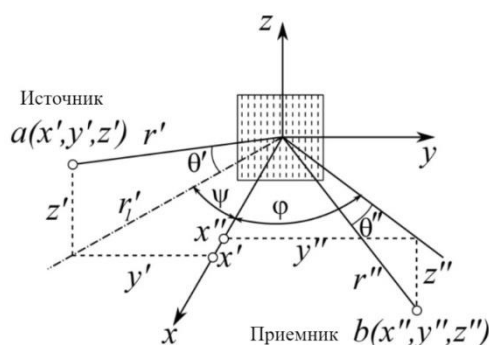


Рис. 2. Схема дифрагирования,  $\theta'$  и  $\Psi$  – углы падения луча,  $\theta''$  и  $\phi$  – углы дифракции, где  $\phi$  и  $\psi$  лежат в плоскости дифракции  $xy$  [2]

Функция  $J_n$  зависит от углов падения  $\theta'$  и  $\Psi$ , углов отражения  $\theta''$  и  $\phi$ , длины волны, числа штрихов и периода решетки. В связи с этим можно сказать, что при известных  $\theta'$ ,  $\theta''$ ,  $\phi$ ,  $\Psi$ ,  $\lambda$ ,  $n$  функция  $J_n$  представляет собой осциллирующую функцию угла дифракции  $\phi$  с резкими максимумами. Иными словами, фактически  $J_n$  представляет собой аппаратную функцию дифракционной решетки.

Положение главных максимумов интерференционной функции определяется следующим образом:  $d \cos \theta' (\sin \Psi + \sin \phi_{\max}) = \pm m \lambda$ , где  $m$  – порядок спектра, данное выражение представляет собой основную формулу дифракционной решетки. При заданных значениях  $\theta'$  и  $\Psi$ , и постоянном  $m$  угол дифракции будет определяться только длиной волны, из чего можно сделать вывод, что для разных длин волн максимумы также будут отличаться, что и описывает пространственное разложение излучения в спектр [3].

Таблица 1

Параметры моделируемой ДР

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Кол-во штрихов на мм	300	Ширина всей ДР, мм	20
Расстояние от источника до ДР, нм	2000	Длина всей ДР, мм	20
Высота пика штриха, нм	3000	Период, нм	2000

В программной среде Python было разработано ПО «Расчет спектральных характеристик оптоэлектронного прибора с дифракционной решеткой», с помощью которого возможно смоделировать спектральные характеристики оптоэлектронного устройства с дифракционной отражательной решеткой. На рисунках 3 и 4 представлены спектральные характеристики для дифракционной решетки со следующими параметрами решетки (см. табл. 1) при длинах волн от 300 до 315 нм, с шагом 1 нм, угле падения  $\theta'$  равном 1, 2 и 3° соответственно.

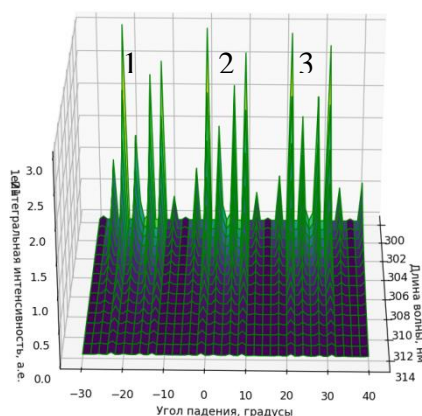


Рис. 3. Спектральные характеристики для описанной выше дифракционной решетки в диапазоне углов падения  $\Psi$  от  $-30^\circ$  до  $40^\circ$  при  $\theta' = 2^\circ$

На рисунке 3 представлена спектральная характеристика в достаточно большом диапазоне углов падения  $\Psi$ , стоит отметить повторяющиеся по форме, но отличающиеся по амплитуде группы пиков 1, 2 и 3 (см. рис.3). Зависимость амплитуды от угла падения  $\theta'$  для группы 2 отображена на рисунке 4.

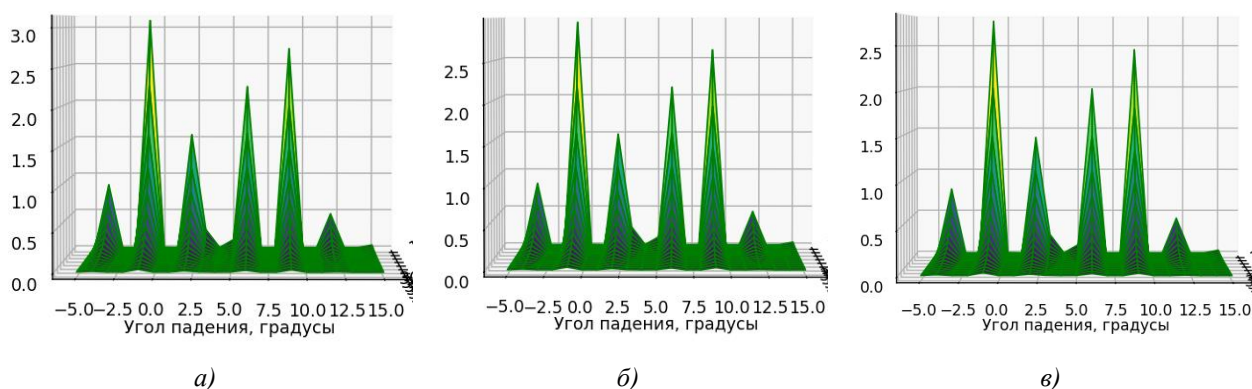


Рис. 4. Спектральные характеристики для описанной выше дифракционной решетки: а) при  $\theta' = 1^\circ$ , б) при  $\theta' = 2^\circ$ , в) при  $\theta' = 3^\circ$

С помощью представленного программного обеспечения возможно моделировать спектральные характеристики дифракционных решеток, поэтому данное ПО может помочь при разработке нового оптоэлектронного устройства – с точки зрения изменения параметров дифракционной решетки в этом приборе, или же выступить в качестве инструмента анализа влияния условий падения излучения на прибор с дифракционной решеткой – с точки зрения изменения характеристик падающего излучения.

### Список литературы

1. Элементарный учебник физики: Учеб. пособие В 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / Под ред. Г.С. Ландсберга. — 13-е изд., — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 656 с.; с. 332
2. Зубков В. И., Кучерова О. В., Зубкова А. В. Методы диагностики структур наноэлектроники и фотоники: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 116 с
3. Мальшев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. – 1979.



## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ КМОП-МИКРОСХЕМЕ

Кошкин С. М.<sup>1,2</sup>, Попов А. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>АО «НПП «ЭЛАР»

**Аннотация.** В работе были рассмотрены особенности тестовых структур, которые используются в составе фотоприёмной КМОП-микросхемы, разработанной АО «НПП «ЭЛАР». В ходе работы было выявлено непредусмотренное поведение этих структур при исследовании характеристик АЦП. Были выявлены недостатки в тестовых структурах и даны соответствующие рекомендации по их устранению.

*Ключевые слова:* фотоприёмная КМОП-микросхема, сигма-дельта АЦП, интегральная нелинейность, дифференциальная нелинейность, тестовая ячейка, «серый клин», «чёрный» референс, «белый» референс.

### Введение

Фотоприёмная КМОП-микросхема это сложное полупроводниковое устройство. Как и любую другую комплексную систему, фоточувствительные КМОП-микросхемы также необходимо тестировать и верифицировать.

Для проведения тестирования работы микросхемы используют тестовые структуры. Это могут быть как отдельные структуры, направленные на проверку только одного параметра микросхемы, так и отдельные тестовые блоки, для комплексной проверки микросхемы. Помимо тестирования работоспособности микросхемы, с помощью тестовых структур получают характеристики ключевых узлов микросхемы или производится настройка узлов микросхемы. В частности, в ФКМ тестовые структуры используются для настройки АЦП на требуемый диапазон сигнала, а также для получения характеристик АЦП.

### Описание тестовых структур, используемых в фоточувствительной КМОП-микросхеме

Объектом исследования является фоточувствительная КМОП-микросхема, разработанная в АО «НПП «ЭЛАР», которая состоит из следующих структурных блоков: секции, блока управления строками, сигма-дельта АЦП, блока буферов и SPI-регистра.

Тестовыми структурами в данной ФКМ являются специальные тестовые ячейки, которые входят в состав секции и расположены в её начале. Тестовые ячейки делятся на «черные», «белые» и «серые». В «черных» ячейках на сигнальный порт InSig подается сигнал BRef, в «белых» – WRef, а в «серых» – сигнал с резисторного делителя, который формирует линейно-нарастающий клин по всей длине столбца. На один конец «серых» ячеек подаётся BRef, на другой – WRef. Тестовые ячейки представлены в следующем составе: 4 столбца «серого клина», 8 столбца «чёрного» референса, 4 столбца «белого» референса (располагаются между столбца двумя частями из столбцов «чёрного» референса). На рисунке 1 представлена принципиальная электрическая схема тестовой ячейки.



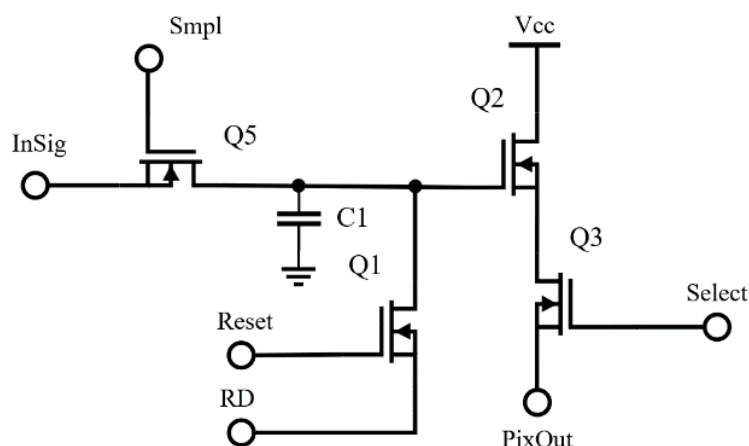


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема тестовой ячейки

Управление ФКМ и считывание данных с неё осуществляется с помощью специального тестового стенда, который позволяет контролировать уровни опорных напряжений, а также формировать временные диаграммы управления. На рисунке 5 изображена исследуемая ФКМ.

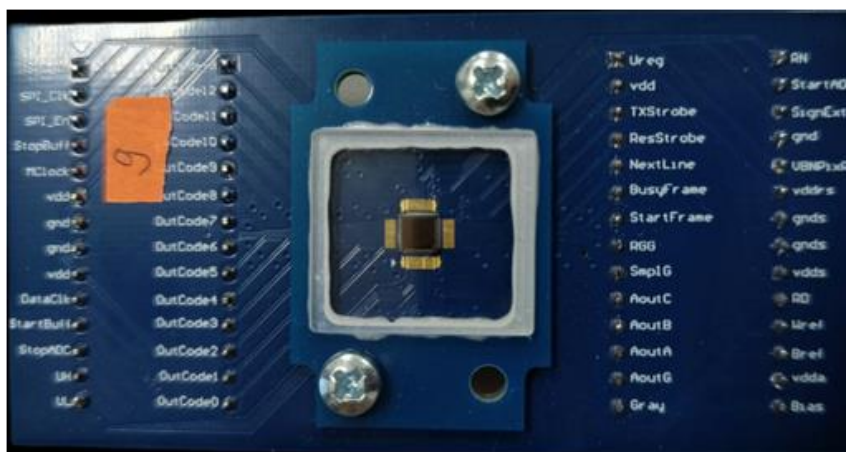


Рис. 2. Внешний вид исследуемой ФКМ

### Использование тестовых ячеек для настройки АЦП в ФКМ

АЦП настраивается таким образом, чтобы рабочий диапазон АЦП соответствовал диапазону полезного сигнала фоточувствительных ячеек. Настройка АЦП осуществляется по столбцам тестовых ячеек, при её проведении подбираются значения напряжений опорных уровней АЦП. АЦП считается настроенным, если установленному диапазону сигнала соответствует цифровой код, т. е. 0 LSB (Least significant bit) – это уровень  $V_{Ref}$ , а 16384 LSB – это уровень  $W_{Ref}$  (разрядность АЦП – 14 бит). Рабочий диапазон сигнала определяется структурой фоточувствительной ячейки.

### Использование тестовых структур для получения характеристик интегральной и дифференциальной нелинейности АЦП

Для исследуемого ФКМ необходимо было получить характеристики интегральной (INL) и дифференциальной (DNL) нелинейностей АЦП. Была произведена настройка АЦП по ячейкам «серого клина» для диапазона сигнала в 1 В.

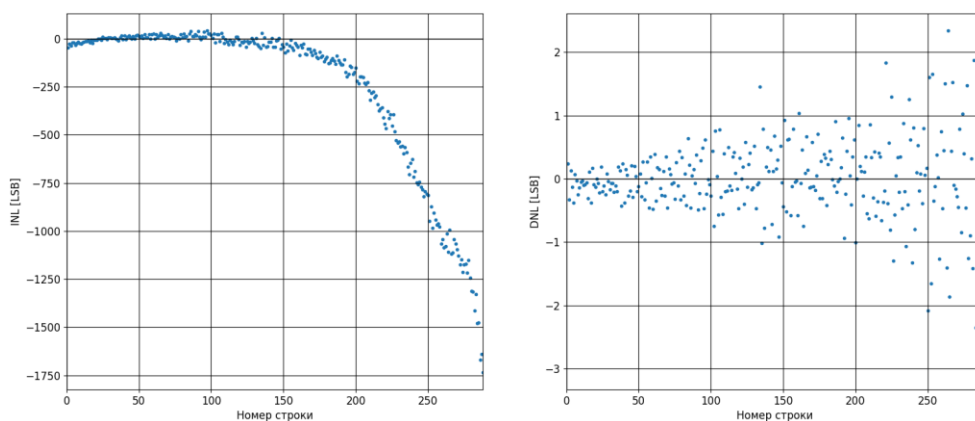


Рис. 3. Интегральная и дифференциальная нелинейности

INL и DNL рассчитывается на основе оцифрованных данных, полученных со строк «серого клина». Характеристики приведены на рисунке 3.

Из полученных характеристик видно, что наблюдается сильная нелинейность в области высокого сигнала. В области малых сигналов также присутствует нелинейность, но не столь выраженная. Наблюдаемая нелинейность обосновывается конструкцией ячейки.

Исследование и последующие моделирование (рисунок 4) показали, что передаточная характеристика истокового повторителя в ячейке (транзистор Q2 на рисунке 1) при входном сигнале меньше 1.6 В – нелинейная. Эта нелинейность и наблюдается на «сером клине».

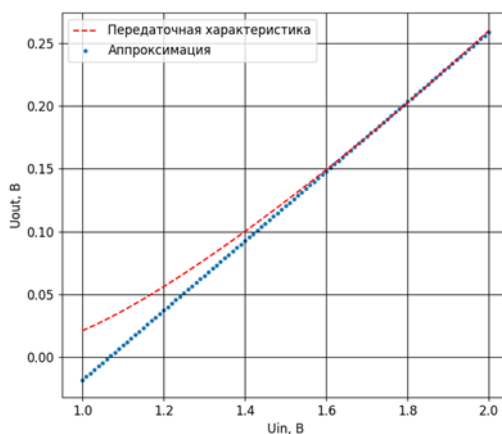


Рис. 4. Передаточная характеристика истокового повторителя ячейки

Учитывая то, что резисторная цепочка находится с краю секции и не окружена другими подобными структурами, это приводит к влиянию такого эффекта как рассогласование элементов между собой, из-за чего они имеют разброс номиналов.

### Выводы

Полученные результаты говорят о том, что в структуре «серого клина» в данной ФКМ имеется ряд недостатков. Для работы ФКМ в диапазоне 1 В необходимо изменить структуру ячейки: заменить текущие транзисторы истокового повторителя и транзистора сброса (Q1 и Q2 на рисунке 1) на низкопороговые, передаточная характеристика которых линейна в рабочем диапазоне. Также необходимо учесть зарядовую ёмкость используемого фотодиода для достижения нужного диапазона.

Для получения более объективных результатов в последующих ФКМ можно разделить тестовые структуры на те, которые необходимы только для настройки и проверки работоспособности ФКМ, и те, с помощью которых может производиться характеристика АЦП или других узлов микросхемы. Для характеристики АЦП можно использовать дополнительный столбцовый АЦП. Но, в отличие от структур с тестовыми ячейками, на него уровень напряжения будет поступать сразу на вход АЦП. Этот уровень можно подавать как из внешней аппаратуры, так и формировать с помощью дополнительного ЦАП большей разрядности, располагаемого на кристалле.

### Список литературы

1. INL/DNL Measurements for High-Speed Analog-to-Digital Converters (ADCs) [Онлайн ресурс]. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/inldnl-measurements-for-types-of-highspeed-adcs.html>
2. Lee, Ilseop; Kim, Byounggho; Lee, Byung-Geun (2015). A Low-power Delta-Sigma ADC for CMOS Image Sensors. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 1–1. doi:10.1109/TCSII.2015.2503706.
3. Chae, Y., & Han, G. (2009). Low Voltage, Low Power, Inverter-Based Switched-Capacitor Delta-Sigma Modulator. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 44(2), 458–472. doi:10.1109/jssc.2008.2010973.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР BUFFER TREE, H-TREE И CLOCK MESH ДЛЯ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ТАКТОВОГО СИГНАЛА

Кузьмин П. А.

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
Москва, г. Зеленоград*

**Аннотация:** В статье приведены результаты сравнительного анализа и моделирования топологических структур Buffer tree, H-tree, Clock mesh на технологических процессах 28 нм и 90 нм. Особенностью данной работы является моделирование с разной плотностью заполнения библиотечными элементами на площади кристалла на этапе PrePlace (30%, 50%, 70%), а также с разными квадратными формами одной размерности для H-tree и Clock mesh структур.

*Ключевые слова:* clock network, Buffer tree, H-tree, Clock mesh, clock skew, power consumption, clock power.

### Введение

Тактовые сигналы доставляются от тактового генератора к приемникам через тактовую сеть (clock network). Тактовая сеть является самой крупной сетью в схеме, распространяющей сигналы, а переключение в ней происходит чаще, чем в любой другой сети, поэтому она часто потребляет 30-40% мощности всего кристалла [1]. При проектировании системы на кристалле (СнК) и ASIC необходимо, чтобы были соблюдены ограничения по времени, мощности и площади. К временным ограничениям относят skew, slew, setup time и hold time. К мощностным ограничениям относят падение напряжения, электромиграцию и энергопотребление.

В настоящее время тема исследования актуальна, поскольку при повышении эффективности тактовой сети можно значительно снизить энергопотребление, повысить производительность и стабильность СнК без масштабирования технологических узлов. В рамках международного симпозиума ISPD2009 было проведено соревнование, одной из целей которого было популяризация проблемы построения тактовых сетей [5]. Повышение эффективности тактовых сетей особенно актуально, когда доступен небольшой список возможных для использования технологических процессов. Одним из

способов повышения эффективности тактовой сети является использование разных топологических структур и их гибридных версий [2-4]. Для развития заданной темы было принято решение исследовать следующий вопрос - имеет ли перспективы использование разных топологических структур с целью увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления? В нашей новой статье будет выявлено, как эти структуры ведут себя на разных технологических процессах. К статье прилагается сравнительный анализ и результаты моделирования, показывающие эффективность применения топологических структур системы синхронизации тактового сигнала Buffer Tree, H-tree и Clock mesh при проектировании с использованием технологических узлов 90 нм и 28 нм.

Особенностью данной работы является моделирование с разной плотностью заполнения библиотечными элементами на площади кристалла на этапе PrePlace (30%, 50%, 70%), а также с разными квадратными формами одной размерности для H-tree и Clock mesh структур. Эти результаты могут послужить основой для будущих научных исследований и производственных проектов, а также ускорить процесс проектирования СнК и ASIC, что повлияет на конкурентоспособность дизайнера.

Оценивать эффективность тактовой сети мы будем через следующие два параметра:

- **Max clock skew** - максимальная разница между временем прихода двух логически связанных регистров;
- **Clock power** - потребляемая мощность в тактовой сети;

Почему нас интересует параметр «clock skew»? Для функционирования схемы необходимо, чтобы были соблюдены условия ограничения по setup time и hold time, которые представлены в формулах 1 и 2 соответственно. Формула 2 показывает — чем больше skew, тем большую задержку необходимо добавлять в левой части уравнения, что повышает потребление и снижает быстродействие. Поэтому необходимо уменьшать clock skew.

$$T + skew_{if} > t_{CQ} + t_{logic} + t_{SU} + \delta_{margin} \cdot \quad (1)$$

$$t_{CQ} + t_{logic} - \delta_{margin} > t_{hold} + skew_{if} \cdot \quad (2)$$

где  $T$  – период тактового сигнала,  $skew_{if}$  – сдвиг рабочего фронта тактового сигнала между двумя регистрами,  $t_{CQ}$  – задержка на регистре,  $t_{logic}$  – задержка комбинаторной логики.  $t_{SU}$  – время установки сигнала данных,  $\delta_{margin}$  – дополнительный пессимизм задержки сигнала,  $t_{hold}$  – время удержания сигнала данных.

Далее будут приведены графики “max clock skew vs clock power”. Левый столбец легенды (синий) характеризует структуры с плотностью заполнения библиотечных элементов при 30%, центральный (красный) — 50%, правый (зеленый) — 70%. Метод оценивания тактовой сети следующий — чем ниже значение **max clock skew** и **clock power**, тем эффективнее тактовая сеть.

Сравнительный анализ тактовой сети был выполнен для дизайнов s38584, s13207, s1238 из набора ISCAS’89 [6], с использованием семи вариантов структур тактовой сети (BufferTree, Htree\_h2, Htree\_h4, Htree\_h6, ClockMesh\_h2m2, ClockMesh\_h4m4, ClockMesh\_h6m6) при хех различных уровнях заполнения библиотечными элементами – 30%, 50%, 70%. “Н” в названии обозначает размер матрицы для расположения буферов при построении H-tree, “М” обозначает размер матрицы для mesh windows.

#### Анализ дизайна s38584

Данный дизайн обладает большим количеством библиотечных элементов, концентрация регистров в нем составляют 18%. Это означает, что между регистрами

располагается больше комбинаторной логики, которая создает задержку и тактовой сети необходимо компенсировать эту задержку.

Структура Buffer tree показывает самые эффективные результаты во всех рассматриваемых условиях.

Из рисунков 1 и 2 следует:

- При технологическом процессе 28 и 90 нм значения max clock skew и clock power при плотности 30% имеют схожий разброс значений по графикам;
- На технологическом процессе 90 нм структура H-tree бн более эффективна чем при технологическом процессе 28 нм;
- На технологическом процессе 90 нм при увеличении плотности заполнения до уровня плотности 50% все структуры теряют свою эффективность;
- При достижении уровня плотности в 70% значение по max clock skew практически одинаковые, как на технологическом процессе 28 нм, так и на 90 нм (кроме H-tree\_h6 и clock mesh\_бн6м).

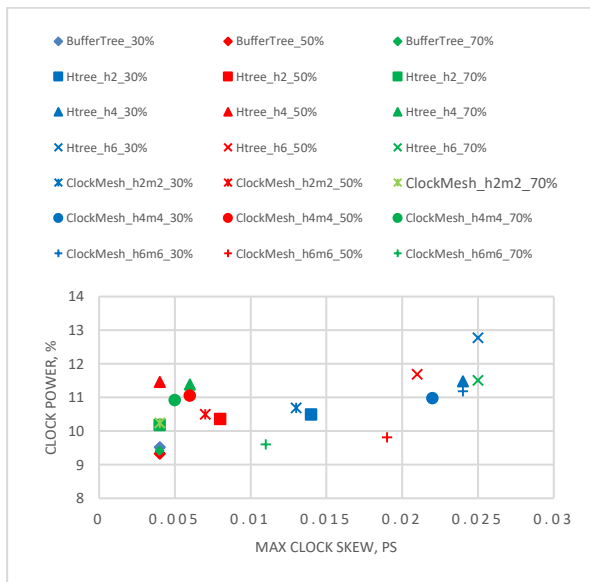


Рис. 5 Max clock skew vs clock power для дизайна s38584 с использованием технологического процесса 28 нм.

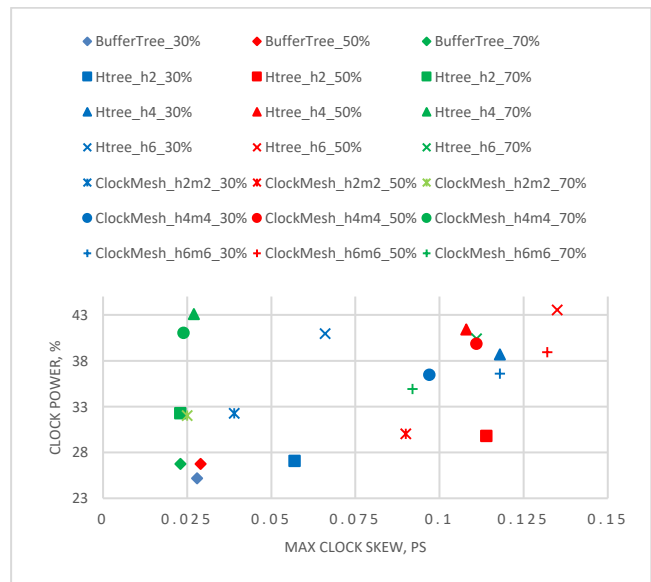


Рис. 6 Max clock skew vs clock power для дизайна s38584 с использованием технологического процесса 90 нм

### Анализ дизайна s13207

Другим дизайном, использованным для сравнения различных вариантов построения тактовой сети, был s13207. Он обладает наибольшей концентрацией регистров (31%) из трех представленных дизайнов. Это значит, что до большего количества приемников необходимо прокладывать тактовую сеть.

Заметим, что при сравнении рисунков 3 и 4 структура Buffer tree на технологическом процессе 28 нм имеет уже больший разброс чем на 90 нм, а также рисунках 1,2,5,6.

На втором месте по эффективности, на обоих рассматриваемых технологических процессах находится структура clock mesh. При этом большую эффективность структуры clock mesh показывает при плотности заполнения 70%.

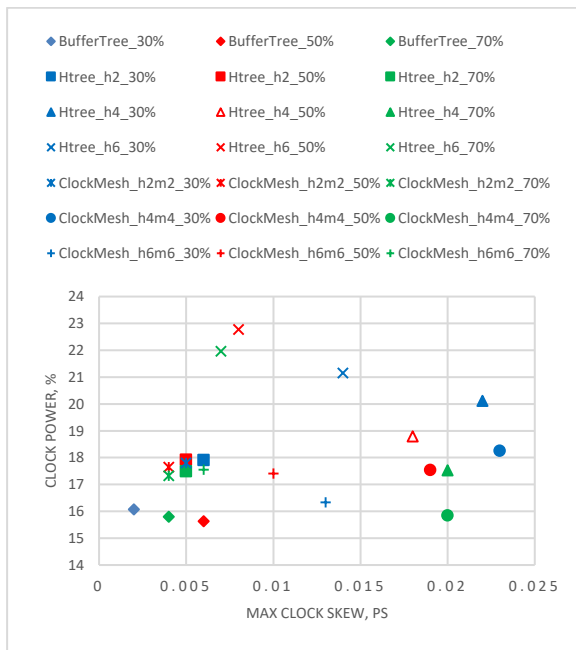


Рис. 7 Max clock skew vs clock power для дизайна s13207 с использованием технологического процесса 28 нм

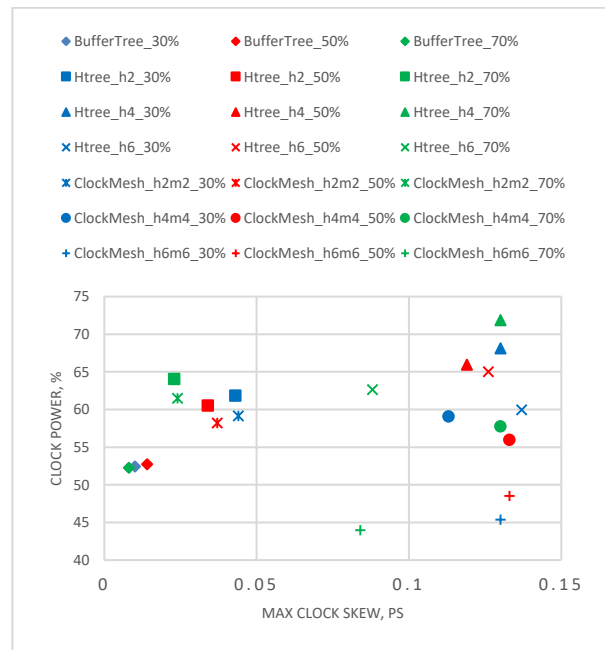


Рис. 8 Max clock skew vs clock power для дизайна s13207 с использованием технологического процесса 90 нм

Из рисунка 3 следует:

- С увеличением количества тактируемых элементов на технологическом процессе 28 нм повысилась эффективность структуры clock mesh;
- С увеличением матриц “h” и “m” повысилась эффективность.

Из рисунка 4 следует:

- С уменьшением матриц “h” и “m” повысилась эффективность;
- Большой разрыв по питанию и быстродействию между другими структурами, на всех плотностях.

### Анализ дизайна s1238

Третьим для анализа был взят дизайн s1238. Он обладает наименьшим количеством библиотечных элементов, наименьшей концентрацией регистров (6%), и наименьшей площадью кристалла. Становится сложнее производить трассировку проводов между приемниками.

Из-за маленькой площади кристалла, относительно размеров проводов, распространяющих сигнал, нельзя рассматривать при анализе следующие структуры, поскольку дизайн обладает плотностью больше 100% после трассировки:

- HTree\_h6 и ClockMesh\_h6m6 при плотности заполнения 70% на технологическом процессе 90 нм;
- ClockMesh\_h6m6 при плотности заполнения 70% на технологическом процессе 28 нм.

Из рисунка 5 следует:

- Разброс значений по max clock skew небольшой;
- Структура clock mesh находится на втором месте по эффективности.

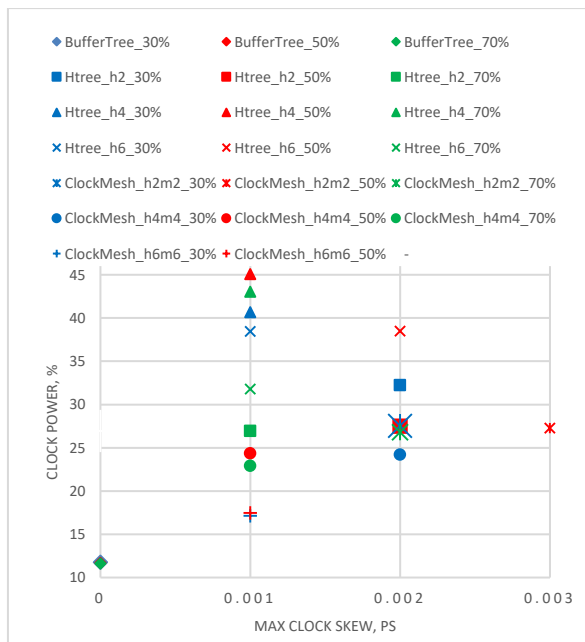


Рис. 9 Max clock skew vs clock power для дизайна s1238 с использованием технологического процесса 28 нм

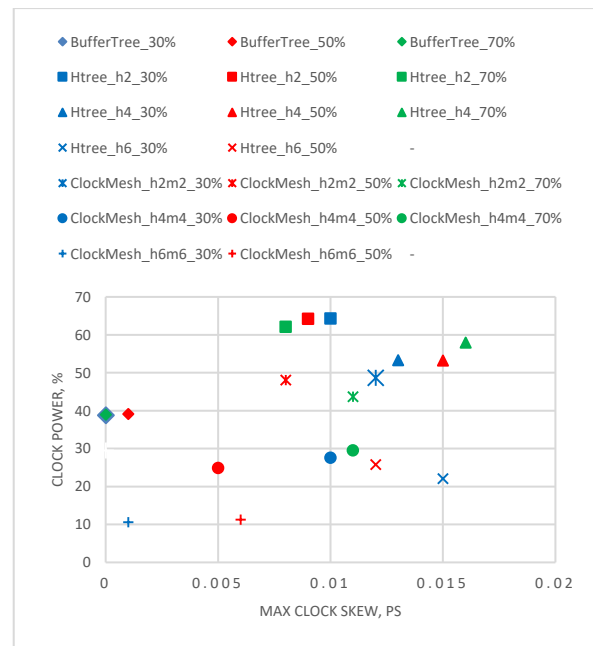


Рис. 10 Max clock skew vs clock power для дизайна s1238 с использованием технологического процесса 90 нм

Из рисунка 6 следует:

- ClockMesh\_h6\_m6 при плотности 30% эффективнее всех в соотношении max clock skew и clock power и обладает значительным преимуществом по отношению к другим структурам, даже перед структурой Buffer tree;
- на технологическом процессе 90 нм более эффективными на всех плотностях являются структуры Clock mesh — больше вариантов структуры clock mesh ближе к нулевому значению.

### Заключение

Из проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- Топологические структуры по-разному влияют на характеристики тактовой сети на разных технологических процессах 28 нм и 90 нм;
- Структура Buffer tree является наиболее простой в использовании, универсальной и показывающей хорошие результаты во всех исследуемых дизайнах. Другие представленные в данной работе структуры в частных случаях имеют преимущества в скорости (меньше max clock skew) или энергопотреблении (меньше clock power). Поэтому на вопрос “имеют ли перспективы использование разных топологических структур с целью увеличения быстродействия и уменьшения энергопотребления”, можно ответить - да;
- С увеличением количества тактируемых элементов на технологическом процессе 28 нм повысилась эффективность структуры clock mesh;
- В дизайне s13207 при технологическом процессе 28 нм структура Buffer tree имеет бóльший разброс на разных плотностях, чем в других рассматриваемых дизайнах;

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

- В дизайне s1238 структура clock mesh показала более эффективный результат чем другие структуры;

В будущем планируется провести более точное spice моделирование, а также сделать упор на исследование структуры clock mesh.

### Список литературы

1. Chakravarthi V. S. A practical approach to VLSI system on chip (SoC) design. – Springer International Publishing, 2020.
2. Farshidi, Ali, Logan Rakai, and Laleh Behjat. "An efficient optimal clock network buffer sizing with slew consideration." 2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). IEEE, Windsor, ON, Canada, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/CCECE.2017.7946666
3. Samanta, Rupak, Jiang Hu, and Peng Li. "Discrete buffer and wire sizing for link-based non-tree clock networks." Proceedings of the 2008 international symposium on Physical design. 2008, pp. 175-181, doi: 10.1145/1353629.1353667
4. Kim J. Clock Tree and Flip-flop Co-optimization for Reducing Power Consumption and Power/Ground Noise of Integrated Circuits and Systems : дис. – 서울대학교 대학원, 2017.
5. Sze C. N. et al. ISPD2009 clock network synthesis contest //Proceedings of the 2009 International Symposium on Physical design. – 2009. – С. 149-150.
6. Brglez F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits //1989 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). – IEEE, 1989. – С. 1929-1934.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ПОРЯДКА В НОВЫХ МАТЕРИАЛАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

МАДИСОН П.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
имени В.И. Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"*

**Аннотация.** Использование аперидического порядка при создании новых материалов и элементов функциональной электроники свидетельствует о появлении нового направления в полупроводниковом материаловедении и требует развития новых представлений физики полупроводников. В настоящей работе представлен новый теоретический подход к описанию икосаэдрических квазикристаллов, базирующийся на теории разбиений и концепции элементарных ячеек. Он позволяет описывать квазикристаллы обеих групп икосаэдрической симметрии, всех трёх типов, причём для каждого случая возможно описание всех трёх вариантов икосаэдрических упаковок. Проведён теоретический анализ предположения Дайсона о связи гипотезы Римана с квазикристаллическим типом порядка, на основе которого создан прототип аперидической дифракционной решётки, щели которой упорядочены в соответствие с распределением нулей дзета-функции Римана.

*Ключевые слова:* квазикристаллы, икосаэдр, концепция элементарных ячеек, упаковка, дзета-функция Римана, аперидическая дифракционная решётка, гипотеза Римана

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-23-00392.

В последнее время ведутся интенсивные исследования по целенаправленному использованию аперидического порядка при создании новых материалов и элементов функциональной электроники [1]. Одно из самых перспективных направлений связано с квазикристаллическим типом упорядочения.

Большинство известных икосаэдрических квазикристаллов представляют из себя многокомпонентные металлические сплавы. Если они обладают структурой высокого качества, то типичные удельные сопротивления многих из них составляют от 100 до 15000



мкОм·см [2], что соответствует нижним значениями области полупроводниковых материалов на границе с проводниками. При  $T \sim 300$  К удельное сопротивление уменьшается с ростом температуры, что характерно для полупроводников. Возможным объяснением этого явления является наличие псевдозапрещенной зоны с низкими значениями плотности состояний [3]. Также сообщалось о возможности существования в икосаэдрических квазикристаллах перехода металл-диэлектрик. Икосаэдрические квазикристаллы демонстрируют ряд уникальных свойств, что позволяет выделять их в отдельный класс перспективных материалов. Задача объяснения свойств икосаэдрических квазикристаллов в данный момент затруднена сложностью описания их структуры.

Особый класс структур с аперидическим порядком образуют фотонные квазикристаллы [4,5]. Работы в области дизайна возможных структур фотонных кристаллов долгое время вдохновлялись аналогией с периодическими кристаллическими решётками, в то время как аперидические фотонные материалы могут предоставить принципиально новые возможности для контроля и управления световыми потоками вплоть до реализации мечты о сказочной «шапке-невидимке» [6].

Основная часть работы посвящена разработке метода описания структуры икосаэдрических квазикристаллов в рамках концепции нескольких элементарных ячеек [7,8]. В рамках данного подхода реализован эффективный алгоритм генерации трёхмерной структуры. Структура квазикристалла описывается в виде списка ячеек. Каждой ячейке ставится в соответствие её тип (один из четырёх зоноэдров), положение ячейки в глобальной упаковке (координата локального центра зоноэдра), ориентация ячейки в пространстве (один из элементов группы симметрии икосаэдра, описывающий поворот ячейки относительно некоторого положения, выбранного за стандартное). Генерация осуществляется путём последовательного применения операций инфляции и дефляции в соответствии с правилами подстановок. В зависимости от выбора стартовой конфигурации можно получить все варианты икосаэдрических упаковок. Элементарные ячейки в полученной упаковке заполняются конкретными атомами таким образом, чтобы не нарушалась локальная симметрия зоноэдров и выполнялись правила локального соответствия между ними. Стартовые конфигурации ячеек, правила подстановок, фрагменты упаковок, полученные после каждой итерации, и любые фрагменты, вырезанные из упаковок тем или иным способом – все они описываются как списки ячеек.

Аналогичным способом можно описывать упаковки, обладающие глобальной икосаэдрической симметрией, но составленные не из зоноэдров, а из тетраэдров. Обычно для этих целей используется разбиение Данцера. Мы используем аналогичное разбиение, но с другим базовым набором тетраэдров (они могут быть выведены из многогранника Вороного шестимерной решётки корней  $D_6$  при его проецировании в трёхмерное пространство). В этом случае упаковка также описывается как список различным образом ориентированных ячеек, генерируемых в соответствии с некоторыми правилами подстановок. Базисный набор ячеек образует не четыре типа зоноэдров, а четыре типа тетраэдров. Орбиты каждого из базовых тетраэдров в икосаэдрической группе симметрии  $I_h$  образуют 120 возможных ориентаций ячеек в пространстве.

Такой подход позволил разрешить проблемы и достичь точного взаимного соответствия между всеми узлами упаковки зоноэдров и соответствующей ей упаковке тетраэдров. Упаковка зоноэдров получается при проецировании из примитивной шестимерной решётки и, следовательно, соответствует квазикристаллам Р-типа. Упаковка тетраэдров получается из шестимерного аналога гранцентрированной кубической

решётки и соответствует квазикристаллами F-типа. Квазикристаллы I-типа описываются на основе тетраэдрического разбиения. Это позволило впервые описать квазикристаллы всех трёх типов в рамках единого формализма.

Если в орбитах тетраэдров все 120 ориентаций считать полностью эквивалентными, то получающаяся структура будет иметь группу симметрии  $I_h$ . Если базовые тетраэдры и их зеркальные копии считать различными, то есть различать собственные и несобственные вращения, то в получающейся структуре будет отсутствовать центр инверсии. Она будет соответствовать группе симметрии I, причём в этом случае возможен учёт правых и левых энантиоморфных форм.

Теоретический подход, основанный на совместном использовании тетраэдрического и зонодрального разбиений, позволяет решать практически все задачи структурного дизайна икосаэдрических квазикристаллов. В рамках единого подхода возможно описание всех трёх вариантов (A, B, C), всех трёх типов (P, I, F) и обеих групп симметрии ( $I_h$ , I), причём при отсутствии центра инверсии возможно рассмотрение энантиоморфных форм.

Последнее время в литературе рассматривается возможность реализации новых физических эффектов на основе аperiodического порядка, лежащего в основе распределения нетривиальных нулей дзета-функции Римана. В частности, сообщалось о возможности создания гипотетического интерферометра Римана [9] и об использовании структур на основе распределения нетривиальных нулей дзета-функции в квантовых вычислениях [10].

На основе сформулированного Дайсоном предположения о возможной связи квазикристаллов с гипотезой Римана [11] нами были исследованы суммы комплексных экспонент по нулям дзета-функции [12]. Они соответствуют преобразованию Фурье от последовательности дельта-функций Дирака, упорядоченных в соответствии с распределением нетривиальных нулей. На Фурье-образах появлялись острые пики в положениях логарифмов простых чисел и их степеней. Этот эффект был положен в основу создания дифракционного оптического элемента нового типа – аperiodической дифракционной решётки. Если щели расположить согласно распределению нулей дзета-функции Римана, то в первом приближении их можно считать точечными источниками, то есть, аperiodической последовательностью дельта-функций Дирака. При достаточном удалении экрана от источника дифрагирующих волн результирующая картина их интерференции хорошо описывается Фурье-образом соответствующей последовательности дельта-функций.

Нами была изготовлена аperiodическая дифракционная решётка, положения щелей которой соответствовали нулям дзета-функции. Для нанопрофилирования использовалась атомно-силовая литография. Полученная дифракционная картина, как и ожидалось, характеризуется наличием дискретных дифракционных максимумов на логарифмах простых чисел и их степеней [13], что является прямой экспериментальной иллюстрацией гипотезы Гильберта–Поля.

Таким образом, использование аperiodического порядка и, в частности, квазикристаллического порядка при создании новых материалов и элементов функциональной электроники свидетельствует о появлении нового направления в полупроводниковом материаловедении и новых разделов физики полупроводников.

Основные результаты прошли апробацию на конференциях высокого уровня. [14-15]. Развитые представления о физике квазикристаллов внедрены в дисциплину «Материаловедение микро- и наносистем» и будут учтены при модернизации учебных

пособий и лабораторного практикума для нового поколения магистрантов, обучающихся по R@D программе «Атомно-молекулярный дизайн и наноархитектоника» [16-17].

### Список литературы

1. Optics of Aperiodic Structures Fundamentals and Device Applications / ed. L. Dal Negro. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
2. Dubois J.M. Properties- and applications of quasicrystals and complex metallic alloys // Chem. Soc. Rev. – 2012. – V. 41. – P. 6760-6777.
3. Pierce F.S., Poon S.J., Guo Q. Electron Localization in Metallic Quasicrystals // Science. – 1993. – V. 261. – №. 5122. – P. 737-739.
4. Man W., Megens M., Steinhardt P.J., Chaikin P.M. Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals // Nature. – 2005. – V. 436. – №. 7053. – P. 993-996.
5. Poddubny A.N., Ivchenko E.L. Photonic quasicrystalline and aperiodic structures // Phys. E: Low-Dimens. Syst. Nanostructures. – 2010. – V. 42. – №. 7. – P. 1871-1895.
6. Boriskina S.V. Making invisible materials // Nature. – 2015. – V. 9. – №. 7. – P. 422-424.
7. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Мошников В.А. Концепция элементарных ячеек в теории квазикристаллов // ЖТФ. – 2024. – Т. 94. – №. 4. – С. 561-574.
8. Madison A.E., Madison P.A. Structure of icosahedral quasicrystals within the multiple-cell approach // Struct. Chem. – 2020. – V. 31. – №. 1. – P. 485-505.
9. Siera G. The Riemann Zeros as Spectrum and the Riemann Hypothesis // Symmetry. – 2019. – V. 11. – №. 4. – #494. – 37p.
10. He R., Ai M.J. Cui J.M et al. Riemann zeros from Floquet engineering a trapped-ion qubit // Npj Quantum Inf. – 1993. – V. 7. – №. 1. – P. 109-115.
11. Dyson F. J. Birds and frogs in mathematics and physics // Not. Am. Math. Soc. – 1984. – V. 56. – P. 212-223.
12. Madison A.E., Madison P.A., Kozyrev S.V. Aperiodic crystals, Riemann zeta function, and primes // Struct. Chem. – 2023. – V. 34. – №. 3. – P. 777-790.
13. Мадисон А.Е., Козодаев Д.А., Казанков А.Н. и др. Аперидическая дифракционная решетка, основанная на связи между простыми числами и нулями дзета-функции Римана // ЖТФ. – 2024. – Т. 94. – №. 4. – С. 658-663.
14. Мадисон А.Е., Мадисон П.А. Перспективы использования аперидического порядка при создании сенсорных материалов и элементов // Сенсорное слияние – 2023: доклады IV Всесоюзного Конгресса по сенсорике и экономике. Кронштадт: 2023. С. 59-66.
15. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А. и др. Аперидическая дифракционная решетка на основе распределения нулей  $\zeta$ -функции Римана // В сб.: НОЛОЕХРО 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 69-73.
16. Бобков А.А., Кононова И.Е., Мошников В.А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры. СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 204 с.
17. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование / Под ред. Мошникова В.А. и Александровой О.А. - Лабораторный практикум / СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.

## ЛАЗЕРНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОСНОВЕ ГЕРМАНИЯ С ДИФФУЗИОННЫМ P-N-ПЕРЕХОДОМ

МАЛЕВСКАЯ А.Д.<sup>1,2</sup>, ХВОСТИКОВА О.А.<sup>1</sup>, СОРОКИНА С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию диффузии цинка из газовой фазы в германий и формированию структуры фотоэлектрического преобразователя лазерного излучения. Изготовлены чипы общим размером 2 мм x 2 мм и площадью подвода излучения  $SDIA=2$  мм<sup>2</sup>. При тестировании под равномерным излучением ксеноновой лампы достигнут монохроматический КПД  $\eta = 17.7\%$  ( $\lambda=1550$  нм, 0.4 Вт). Неравномерность засветки (лазерный луч, Гауссово распределение мощности, 0.4 Вт-1.0 Вт) снижает КПД преобразователя на 1.7-2.1 %.

*Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, германий, лазерное излучение, диффузия, КПД*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №24-29-20018*

Развитие фотоэлектрического способа преобразования энергии охватывает все большее число полупроводниковых материалов и видов излучения. Германий – один из основных материалов электронной техники – нашел свое применение в термофотоэлектрических преобразователях инфракрасного излучения [1,2], при получении солнечных элементов и модулей на их основе [3], адаптируется сегодня для лазерного облучения и дистанционной передачи энергии [4]. При передаче мощности на большие расстояния через атмосферу или по оптоволокну (рис. 1) особый интерес представляет  $\lambda=1310$  нм и  $\lambda=1550$  нм - длины волн с наименьшим затуханием сигнала.

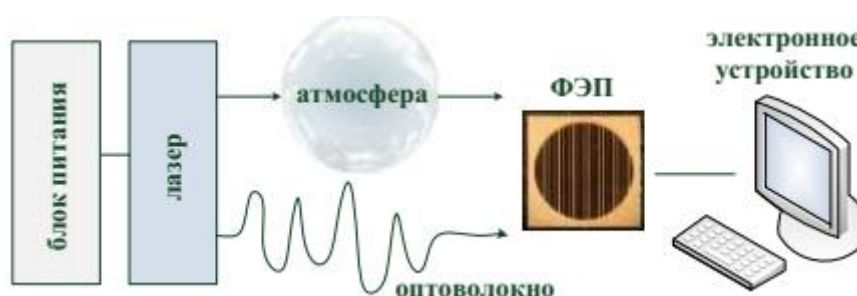


Рис. 1. Блок-схема системы дистанционной передачи энергии

Представленная работа является продолжением исследований по созданию однопереходных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе Ge методом диффузии цинка из газовой фазы. Фотоэлементные структуры формировали на установке жидкофазной эпитаксии в графитовой кассете пенального типа. Диффузию проводили в атмосфере водорода при температуре  $\sim 670$  °С. Использовались подложки n-типа (100) с концентрацией  $n=(1-3) 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Подготовка поверхности включала химическое травление (20 мкм) в растворе HF : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O=1 : 1 : 5. Методом фотолитографии формировалась периферическая рамка из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, предотвращающая образование p-n-перехода на торцах преобразователя. Вид ФЭП в разрезе представлен на рис. 2а. «Паразитный» диффузионный p-n-переход с обратной стороны удалялся шлифовкой или травлением поверхности. Первый вариант предпочтительнее, так как способствует адгезии тыльного контакта.

Глубину залегания p-n-перехода ( $d$ ) регулировали временем диффузионного процесса. Максимальная спектральная фоточувствительность ( $SR$ ) достигнута при диффузии в течение  $\sim 30-40$  мин и заглуплении p-n-перехода на  $d\sim 0.3$  мкм (рис. 3). Значения  $SR$  в этом случае близки к теоретическому пределу (пунктирная кривая на рис. 3). Подстройка под длину волны падающего лазерного излучения с  $\lambda=1550$  нм осуществлялась оптимизацией просветляющего покрытия преобразователя (ARC на рис. 2а). Спектр отражения для пленок ZnS-MgF<sub>2</sub> показан на рис. 3 кривой R.

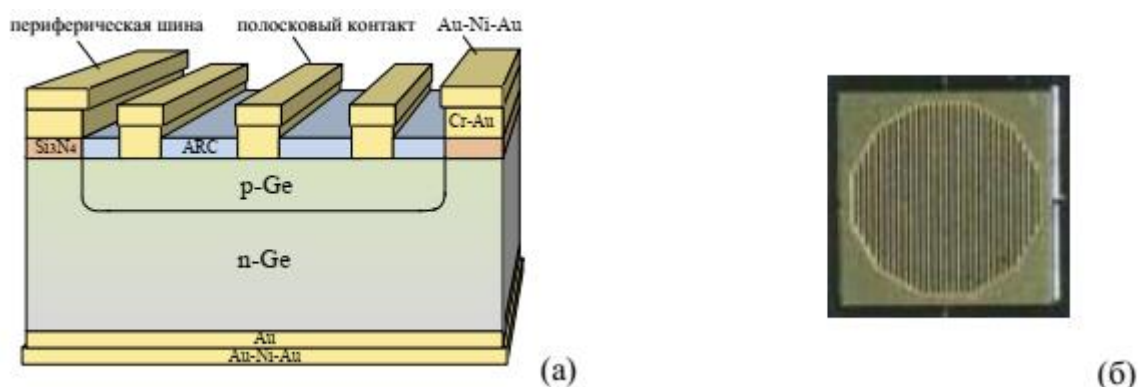


Рис. 2. Фотозлектрический преобразователь: схематический вид в разрезе (а) и вид сверху (б)

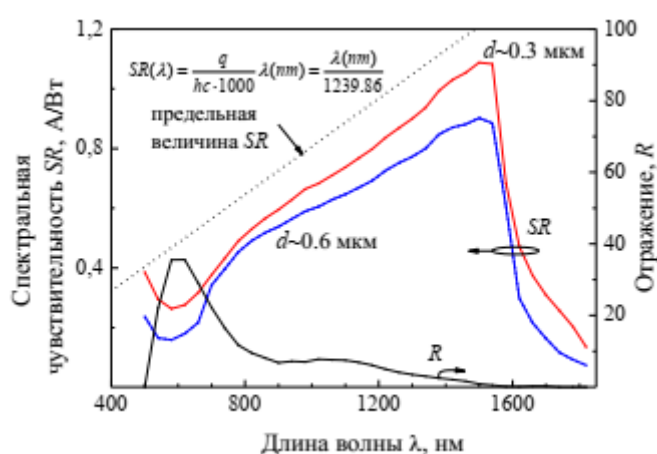


Рис. 3. Спектральная чувствительность ФЭП на основе Ge при глубине p-n-перехода 0.3 и 0.6 мкм

Фронтальный и тыльный контакты формировали термическим напылением пленок CrAu и Au соответственно. Толщину контакта наращивали электрохимическим осаждением слоев Au, Ni и Au.

Диаметр падающего на ФЭП лазерного пятна ограничен, поэтому разрабатывались чипы минимальных размеров (2.0 мм x 2.0 мм). Площадь для подвода излучения  $S_{DIA}$  составляла 2.0 мм<sup>2</sup>. Широкая токосборная шина располагалась на периферии образца вне указанной области  $S_{DIA}$  (рис. 2б).

При тестировании изготовленных ФЭП под равномерным излучением ксеноновой лампы с короткими (~1.5 мс) одиночными световыми импульсами исключается неконтролируемый радиационный нагрев образцов. Термостабильное состояние установленного на плату преобразователя подтверждается логарифмическим ростом напряжения холостого хода  $U_{XX}$  с освещенностью. При оптической мощности 0.2 Вт достигнут монохроматический КПД  $\eta = 17.7\%$  ( $\lambda = 1550$  нм). Поведение тока короткого замыкания  $I_{KЗ}$ , фактора заполнения нагрузочной характеристики  $FF$ ,  $U_{XX}$  и  $\eta$  при повышении мощности оптического сигнала показывает рис. 4.

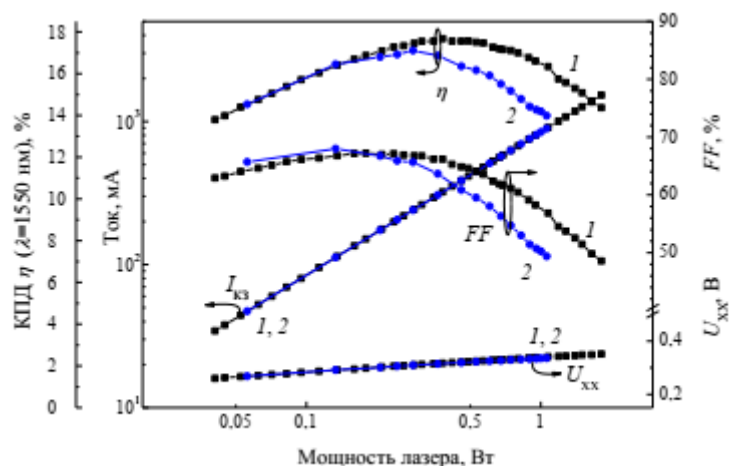


Рис. 4.  $I_{K3}$ ,  $U_{XX}$ ,  $FF$  и  $KПД$  преобразователя ( $S_{DIA}=2.0 \text{ мм}^2$ ) в зависимости от мощности лазерного излучения: 1 – ксеноновая лампа (равномерная засветка), 2 – засветка сильно неоднородным лазерным лучом (Гауссово распределение,  $\lambda = 1550 \text{ нм}$ )

На эффективность преобразования влияет степень неравномерности лазерного излучения, определяемая способом ввода (по воздуху или оптическому волокну) и типом лазера. Для одномодового лазера неоднородность луча может быть очень существенной. Результаты тестирования при засветке импульсным (300мкс/49700мкс) лазером с  $\lambda=1550 \text{ нм}$  представлены на рис. 4 кривыми 2. Излучение подводилось по оптоволокну, формируя световое пятно с гауссовым распределением интенсивности в пределах площади  $S_{DIA}$ . Легко видеть, что импульсный режим подачи оптического сигнала позволил избежать какого-либо влияния радиационного нагрева на выходные фотоэлектрические параметры ФЭП. Однако неравномерность луча мощностью 1 Вт снижает  $KПД$  преобразователя на ~2 %. Максимальная эффективность 17.7% получена при равномерном излучении и падающей мощности 0.4 Вт.

Наибольший достигнутый в ФТИ им. А.Ф. Иоффе  $KПД$  преобразователей на германии, полученных диффузионным способом, составляет 20.0% ( $S_{DIA} = 3.14 \text{ мм}^2$ , равномерная засветка, рис. 5). Для длины волны 1310 нм значение  $\eta$  падает до 19.1%.

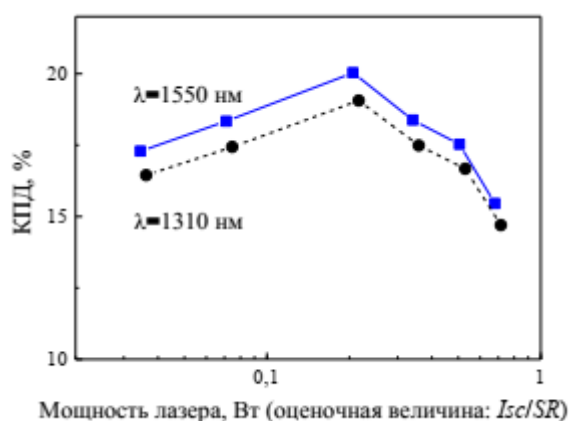


Рис. 5. Монохроматическая эффективность ФЭП при разной длине волны падающего излучения ( $S_{DIA} = 3.14 \text{ мм}^2$ , равномерная засветка)

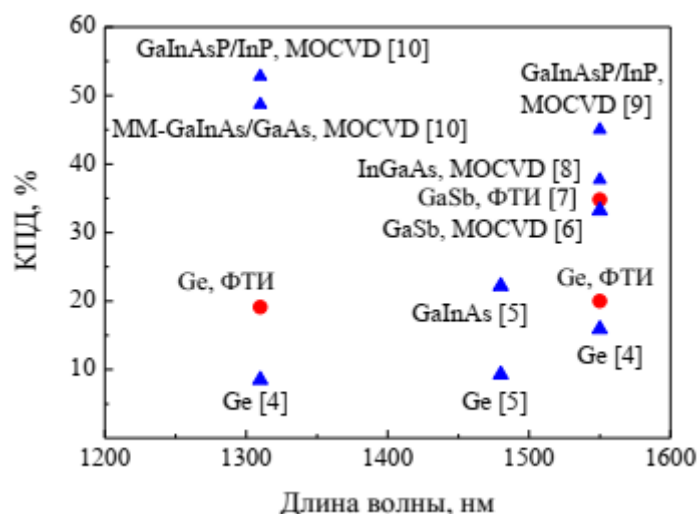


Рис. 6. КПД преобразователей лазерного излучения разных исследовательских групп. Красный цвет символов – результаты ФТИ им. А.Ф. Иоффе, синий – опубликованные результаты научных центров мира

Опубликованные в научной литературе данные о преобразовании лазерного излучения с длиной волны 1310, 1480 и 1550 нм суммированы на рис. 6. Полученные в ФТИ преобразователи превосходят по КПД аналоги на основе германия других исследовательских групп [4]. Они несколько уступают в эффективности диффузионным [7] и эпитаксиальным [6] ФЭП на основе GaSb и заметно проигрывают MOCVD-структурам с согласованными четверными твердыми растворами GaInAsP/InP [10] и метаморфными слоями MMGaInAs/GaAs [8-10], но значительно выигрывают в стоимости и возможности переноса технологии в массовое производство.

### Список литературы

1. Posthuma N.E., Heide J., Flamand G., Poormans J. Development of low cost germanium photovoltaic cells for application in TPV using spin on diffusants. Proc. of the 6th Conference Thermophotovoltaic Generation of Electricity, A. Gorpınath et al., eds., (Freiburg, Germany, 2004), p. 337-344. DOI: 10.1063/1.1841911.
2. Datas A., Algora C. Development and experimental evaluation of a complete solar thermophotovoltaic system. Prog. Photovolt: Res. Appl. 21, 1025 (2013). DOI: 10.1002/pip.2201.
3. Posthuma N.E., Heide J., Flamand G., Poortmans J. Emitter formation and contact realization by diffusion for germanium photovoltaic devices. IEEE Transactions on Electron Devices 54 (5), 1210 (2007). DOI: 10.1109/TED.2007.894610.
4. Allwood G., Wild G., Hinckley S. Proc. Conference: Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices (COMMAD) (2012). DOI: 10.1109/COMMAD.2012.6472337.
5. Miyakawa H., Tanaka Y., Kurokawa T. Design approaches to power-over-optical local-area-network systems, Applied Optics, 43 (6), 2004.
6. Bett A.W., Dimroth F., Lockenhoff R., Oliva E., Schubert J. III-V solar cells under monochromatic illumination. Proc. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA, 2008, pp. 1-5, DOI: 10.1109/PVSC.2008.4922910.
7. Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Хвостикова О.А., Левин Р.В., Пушный Б.В., Тимошина Н.Х., Андреев В.М.. Фотоэлектрические преобразователи лазерного излучения ( $\lambda=1550$  нм) на основе GaSb: метод получения и характеристики. ФТП, 50 (10), 1358 (2016).
8. Helmers H., Höhn O., Tibbits T., Schaurte M., Noman Amin H.M., D. Lackner. Unlocking 1550 nm laser power conversion by InGaAs single- and multi-junction PV cells. IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, USA, 2022, pp. 1235-1235, DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938627
9. Jarvis S.D., Mukherjee J., Perren M., Sweeney S.J. Development and characterisation of laser power converters for optical power transfer applications. IET Optoelectron., 8 (2) 64 (2014). DOI: 10.1049/iet-opt.2013.0066.

10. Beattie M.N., Helmers H., Forcade G.P., Valdivia Ch.E., Höhn O., Hinzer K. InP- and GaAs-based photonic power converters under O-band laser illumination: performance analysis and comparison. IEEE Journal of Photovoltaics, 13 (1), 113 (2023). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2022.321893.

## КИНЕТИКА СИЛИЦИДООБРАЗОВАНИЯ В ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУРАХ Yb-Si(111)

МАЛЬКОВ Д.А.<sup>1,2</sup>, СОРОКИНА С.В.<sup>2</sup>, КУЗЬМИН М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*

**Аннотация.** В настоящей работе было проведено исследование кинетики формирования силицидных фаз в пленочных структурах Yb-Si(111) помощью комплекса экспериментальных методов (электронной Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопий (ЭОС и РФЭС), дифракции медленных электронов (ДМЭ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и метода контактной разности потенциалов (КРП) для измерения работы выхода). Впервые получен и количественно проанализирован комплекс фотоэлектронных спектров для указанной структуры при различных температурах. Было проведено сравнение с результатами Оже-спектроскопии, полученными ранее. На основе полученных результатов сделан ряд выводов о кинетике формирования силицидных фаз в пленочной структуре Yb-Si(111).

*Ключевые слова:* поверхность, тонкие пленки, кремний, иттербий, силициды

В последнее десятилетие дисилициды иттербия ( $\text{YbSi}_{2-x}$ ) привлекают повышенное внимание благодаря перспективе их использования при создании новых полевых транзисторов с барьером Шоттки [1-3], термоэлектрических преобразователей, работающих эффективно при комнатной температуре [4] и кремниевых солнечных элементов, которые не содержат легирующих слоев [5]. Ввиду того, что вышеуказанные материалы могут быть интегрированы в кремниевые технологии, необходимо детальное понимание механизмов формирования силицидных фаз в пленочных структурах Yb-Si. Более того, такая информация важна и для исследования другого родственного материала – дисиликата иттербия ( $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ). Последний имеет также высокую практическую ценность и может применяться в квантовых димерных магнитах [6], инфракрасных сцинтилляторах для медицинской визуализации [7], а также в качестве защитного покрытия в авиационных турбинах [8,9].

Как известно, механизм формирования дисилицидов редкоземельных металлов (РЗМ) отличается от механизма формирования силицидов других металлов [10]. Это отличие обусловлено наличием вакансий в слоях атомов кремния решетки дисилицидов РЗМ, что обеспечивает взрывную диффузию атомов из кремниевой подложки в решетку металла при достижении критической температуры (~700-750 К). В то же время крайне мало информации о процессах силицидообразования в системах РЗМ-Si при более низких температурах. В частности, неизвестно, могут ли образовываться силициды другой стехиометрии в системах Yb-Si. Отсутствие этой информации сдерживает создание обобщенной модели пленочных структур редкоземельный металл-кремний.

Из вышесказанного вытекает задача настоящего исследования. Его целью было получить сведения о кинетике формирования силицидных фаз в системе Yb-Si(111) с помощью комплекса экспериментальных методов (электронной Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопий (ЭОС и РФЭС), дифракции медленных электронов



(ДМЭ), сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) и метода контактной разности потенциалов (КРП) для измерения работы выхода).

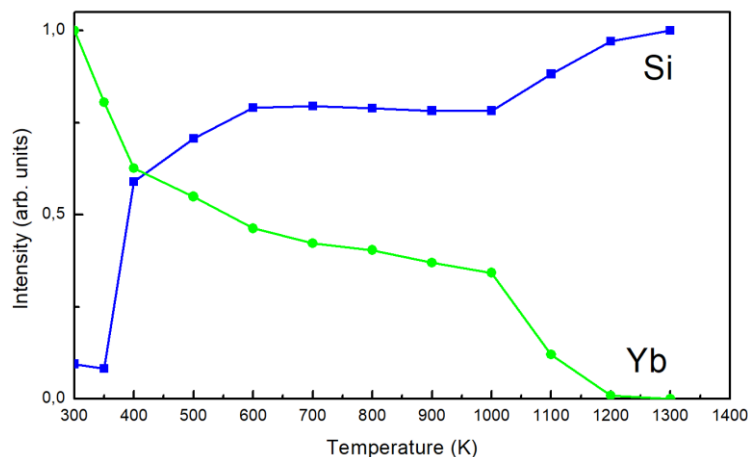


Рис. 1. Температурные зависимости Оже-сигналов для Yb и Si в структуре Yb-Si(111)

В качестве метода формирования системы Yb-Si(111) был выбран метод твердофазной эпитаксии. Нанопленка иттербия наносилась на чистую поверхность кремния ( $7 \times 7$ ) при комнатной температуре. Толщина пленки иттербия составила 16 монослоев (ML). Далее структура Yb-Si прогревалась до определенных температур, и регистрировались Оже-спектры и спектры РФЭС. Затем интенсивности сигналов Yb и Si при различных температурах были нормированы на единых графиках. На рис.1 и рис.2 представлены температурные зависимости Оже-сигналов и сигналов РФЭС системы Yb-Si(111).

Согласно результатам, представленным на рис.1, видно, что Оже-сигнал кремния резко возрастает после прогрева при 400 К. Это свидетельствует о том, что уже при этой температуре происходит интенсивное перемешивание атомов подложки и пленки, что приводит к формированию нескольких силицидных фаз, одна из которых скорее всего является моносилицидом (YbSi), а другие обогащены металлом (Yb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, Yb<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>). Этот процесс заканчивается при 600 К. Такой вывод следует из того, что в интервале температур 600–1000 К Оже-сигнал кремния остается постоянным. Он начинает расти только при  $T > 1000$  К, когда происходит интенсивное испарение иттербия с поверхности, о чем свидетельствует зависимость от температуры величины  $I(Yb)$ .

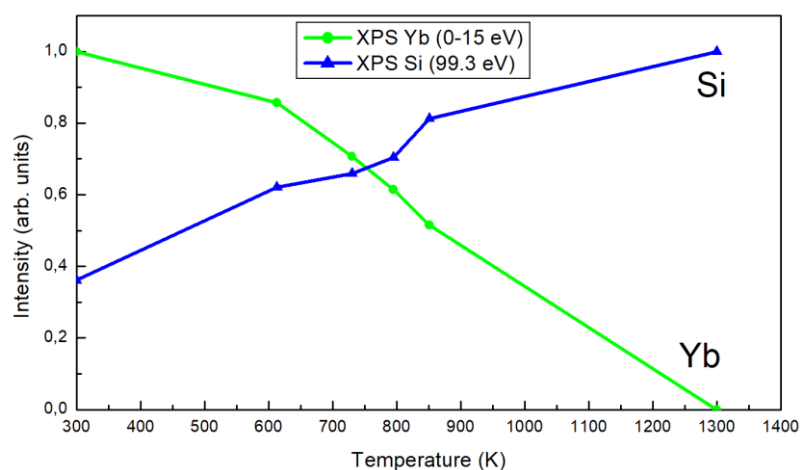
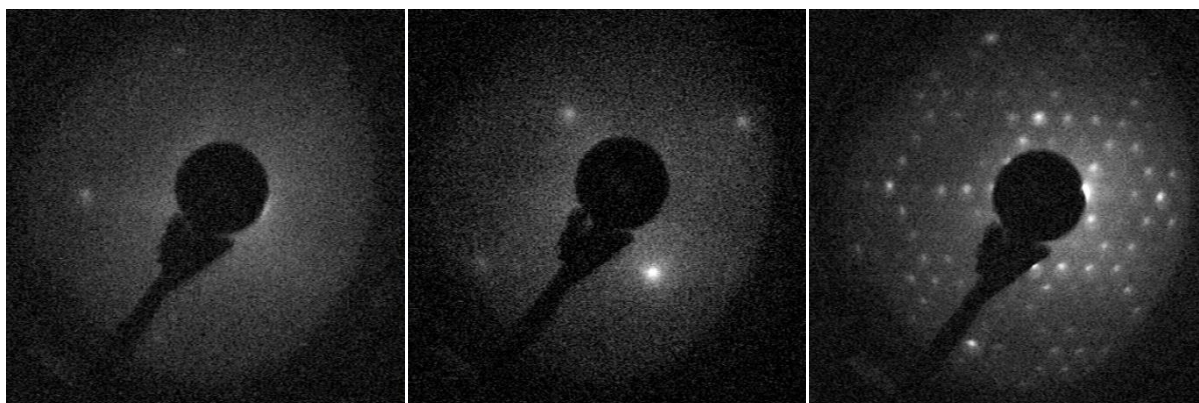


Рис. 2. Температурные зависимости сигналов РФЭС для Yb и Si в структуре Yb-Si(111)

Что касается температурных зависимостей сигналов РФЭС (рис.2), качественно характер напоминает температурные зависимости Оже-сигналов. Тем не менее, присутствуют некоторые отличия. В отличие от результатов ЭОС, при комнатной температуре интенсивность РФЭС сигнала кремния ненулевая. Это можно объяснить тем, что в методе РФЭС длина свободного пробега электронов в несколько раз превышает аналогичную величину в методе ЭОС, и поэтому пленка иттербия экранирует кремниевую подложку существенно менее эффективно. Кроме того, согласно данным СТМ, в пленке Yb имеют место локальные дефекты - поры (так называемые pin holes).

С помощью метода ДМЭ были получены дифракционные картины поверхности полученной структуры (рис.3). После напыления пленки иттербия (толщина ~6 nm) на Si(111)7x7 при комнатной температуре дифракционная картина от подложки полностью пропадает (наблюдается только фон, а рефлексы отсутствуют). Это означает, что растущая пленка полностью покрывает поверхность и что она не имеет дальнего порядка. По мере увеличения прогрева при 700 К появляются рефлексы структуры (1x1), что свидетельствует о формировании дальнего порядка в формирующейся пленке силицида. Структура (1x1) полностью согласуется с атомной геометрией эпитаксиальных слоев дисилицида YbSi<sub>2-x</sub> на Si(111). При дальнейшем повышении температуры прогрева яркость рефлексов картины (1x1) увеличивается, а упорядочение в пленке силицида возрастает. Наконец, при 1300 К атомы металла испаряются с поверхности, и на экране дифрактометра восстанавливается картина 7x7 исходной чистой кремниевой подложки.



*Рис. 3. Дифракционные картины поверхности структуры Yb-Si(111) Температуры прогрева: 700 К (слева), 800 К (в центре) и 1300 К (справа). Энергия электронов: 95, 96 и 81 эВ соответственно*

С помощью метода КРП была измерена работа выхода системы Yb-Si(111) с последовательным ростом температуры. При комнатной температуре значение работы выхода соответствует величине, характерной для пленки металлического иттербия. После прогрева до 450К работа выхода уменьшается до значения 2,6 эВ. Это означает, что при данных температурах (~400-500К) начинается процесс диффузии атомов Si в пленку металла и образование силицида. Анализ показывает, что образующиеся поверхностные силицидные фазы либо обогащены металлом, либо являются моносилицидом иттербия, и что поверхность формирующейся пленки образована атомами Yb. С дальнейшим ростом температуры, можно наблюдать активный рост работы выхода вплоть до 4 эВ. Это свидетельствует об изменении стехиометрии поверхностного соединения и образовании дисилицида YbSi<sub>2-x</sub>. Поверхность такой пленки покрыта слоем атомов полупроводника.

### **Заключение**

Установлено, что процесс образования дисилицида иттербия на Si(111) подложке включает несколько стадий: вначале металлическая пленка иттербия переходит в пленку, образованную фазами силицидов, обогащенных металлом, и фазой моносилицида (при T= 400...500 К.), а затем при более высоких температурах (при 600 К и выше) образуется дисилицид иттербия.

Качественный анализ температурных зависимостей РФЭС для системы Yb-Si(111) показал их сходство с температурными зависимостями ЭОС. Однако, имеются различия, например – ненулевая интенсивность сигнала кремния при комнатной температуре, объяснимая более эффективной экранировкой сигнала кремния пленкой иттербия в случае ЭОС. Дифракционные картины поверхности показали, что растущая пленка иттербия полностью покрывает поверхность и не имеет дальнего порядка при комнатной температуре. Однако, при повышении температуры появляется дальний порядок, соответствующий атомной геометрии дисилицида YbSi<sub>2-x</sub> на Si(111). Методом контактной разности потенциалов была измерена работа выхода системы Yb-Si(111) с последовательным ростом температуры. Уменьшение работы выхода при повышении температуры до 450 К указывает на начало процесса диффузии атомов Si в пленку металла и формирование силицидных фаз, обогащенных металлом. Повышение работы выхода до 4 эВ при дальнейшем росте температуры свидетельствует о формировании дисилицида YbSi<sub>2-x</sub>. Проведенное исследование дает важные данные о кинетике формирования силицидных фаз в системе Yb-Si(111).

### **Список литературы**

1. Shiyang Zhu, Jingde Chen, M.-F. Li, S. J. Lee, Jagar Singh, C. X. Zhu, Anyan Du, C. H. Tung, Albert Chin, D. L. Kwong. N-Type Schottky Barrier Source/Drain MOSFET Using Ytterbium Silicide. IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 25, NO. 8, AUGUST 2004.
2. Daniel Connelly, Carl Faulkner, P. A. Clifton, and D. E. Grupp. Fermi-level depinning for low-barrier Schottky source/drain transistors. APPLIED PHYSICS LETTERS 88, 012105 (2006).
3. Keng-Hui Shen, Szu-Hung Chen, Wei-Ting Liu, Bao-Hsien Wu, Lih-Juann Chen. Effective Schottky barrier lowering of Ni silicide/p-Si(100) using an ytterbium confinement structure for high performance n-type MOSFETs. Materials & Design Volume 114, 15 January 2017, Pages 220-225.
4. Sora-at Tanusilp, Yuji Ohishi, Hiroaki Muta, Shinsuke Yamanaka, Akinori Nishide, Jun Hayakawa, and Ken Kurosaki. Ytterbium Silicide (YbSi<sub>2</sub>): A Promising Thermoelectric Material with a High Power Factor at Room Temperature. Phys. Status Solidi RRL 2017, 1700372.

5. Jinyoun Cho, Hariharsudan Sivaramkrishnan Radhakrishnan, Maria Recaman Payo, Maarten Debucquoy, Arvid van der Heide, Ivan Gordon, Jozef Szlufcik, and Jef Poortmans. Low Work Function Ytterbium Silicide Contact for Doping-Free Silicon Solar Cells. ACS Applied Energy Materials 2020, 3, 4, 3826-3834.
6. Gavin Hester, H. S. Nair, T. Reeder, D. R. Yahne, T. N. DeLazzer, L. Berges, D. Ziat, J. R. Neilson, A. A. Aczel, G. Sala, J. A. Quilliam, and K. A. Ross. Novel Strongly Spin-Orbit Coupled Quantum Dimer Magnet: Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 027201 (2019).
7. Takahiko Horiai, Shunsuke Kurosawa, Rikito Murakami, Jan Pejchal, Akihiro Yamaji, Yasuhiro Shoji, Valery I. Chani, Yuji Ohashi, Kei Kamada, Yuui Yokota, Akira Yoshikawa. Crystal growth and luminescence properties of Yb<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> infra-red emission scintillator. Optical Materials Volume 58, August 2016, Pages 14-17.
8. R. Naslain, Compos. Sci. Technol., 2004, 64, 155–170.
9. F. W. Zok, Am. Ceram. Soc. Bull., 2016, 95, 22–28.
10. Giorgio Rossi. d AND f METAL INTERFACE FORMATION ON SILICON. Surface Science Reports 7 (1987) 1-101

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП НАНОСТЕРЖНЕЙ ОКСИДА ЦИНКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ**

МАРЦЕНЮК Е.Н.<sup>1</sup>, СИТКОВ Н.О.<sup>1</sup>, КОЛЯДА Д.В.<sup>1</sup>, РЯБКО А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)*

Наноструктурированные материалы нашли широкое применение в качестве трансдьюсерных структур биосенсорных систем, благодаря уникальным физическим и химическим свойствам [1]. В частности, в импедиметрических биосенсорах [2], в которых для обнаружения биологических аналитов (белки, ДНК, вирусы и др.) измеряется комплексное сопротивление электродов в зависимости от частоты приложенного переменного напряжения, может быть использован оксид цинка (ZnO), который позволяет формировать нанокристаллы с высокой удельной площадью, способствующей высокой плотности иммобилизации биораспознавателей и, следовательно, загрузке аналита, что влияет на эффективность биосенсоров. Связывание биораспознавателей с поверхностью ZnO обеспечивается физической адсорбцией или применением сшивающих молекул (кросслинкеров) [3-5].

В данной работе представлены результаты исследования влияния температуры отжига в течение 5 минут при температуре 300°C и 500°C в воздушной атмосфере на ZnO, полученный низкотемпературным гидротермальным методом в виде разупорядоченных ограниченных наностержней с диаметром в диапазоне 50-100 нм и характерной длиной ~ 500 нм с предварительным осаждением затравочного слоя методом ультразвукового спрей-пиролиза, на поверхностную концентрацию гидроксильных групп для последующей активации поверхности аминоклассами с помощью 3-аминопропилтриметоксисилана (АРТМС) путем силанизации.

Для оценки качества силанизации и дальнейшей иммобилизации биоселективного элемента использовали опосредованный химический метод контроля, заключающийся в связывании на поверхности покрытия из наностержней ZnO белка А и последующим

проявлением его связывания с антителами, мечеными пероксидазой хрена, в результате качественной химической реакции. Выявление связанных антител осуществлялось с помощью проявления подложек 3,3', 5,5'-тетраметилбензидином (ТМБ). Морфология образцов ZnO определялась с помощью растровой электронной микроскопии (TESCAN MIRA). Поверхность наностержней ZnO исследовалась с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Инфракрасная спектроскопия получена с помощью Фурье-спектрометра VERTEX 80. Концентрацию адсорбированных OH-групп в синтезируемых НС ZnO с отжигом при 500°C с помощью Фурье-ИК спектроскопии (FTIR).

Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии позволили оценить качество поверхности наностержней ZnO, полученных при температурах 300°C и 500°C, и показали, что отжиг на температуре 500°C обеспечил повышение концентрации вакансий кислорода. Результаты исследования позволяют обеспечить условия для эффективной иммобилизации распознающих элементов в импедиметрических биосенсорах. Полученные результаты также актуальны для адсорбционной иммобилизации биораспознавателей, применения НС ZnO в газовых сенсорах и фотокатализаторах.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-01136).*

#### **Список литературы**

1. Nayl A.A. et al. The nanomaterials and recent progress in biosensing systems: A review // Trends in Environmental Analytical Chemistry. 2020. Vol. 26. P. e00087.
2. Sitkov N. et al. Hybrid Impedimetric Biosensors for Express Protein Markers Detection // Micromachines. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Vol. 15, № 2. P. 181–181.
3. Chen B. et al. A non-faradaic impedimetric biosensor for monitoring of caspase 9 in mammalian cell culture // Bioelectrochemistry. 2023. Vol. 153. P. 108456.
4. Cao L. et al. Nanoparticle-based 3D membrane for impedimetric biosensor applications // Bioelectrochemistry. 2020. Vol. 136. P. 107593.
5. Tanak A.S. et al. Non-faradaic electrochemical impedimetric profiling of procalcitonin and C-reactive protein as a dual marker biosensor for early sepsis detection // Analytica Chimica Acta: X. 2019. Vol. 3. P. 100029.

## **СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ZNO И FE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА.**

МАТВЕЕВ Д.А., МАКСИМОВ А.И.

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной работе рассматривается синтез композиционных материалов на основе ZnO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такие материалы используются для очищения загрязнений в результате человеческой жизнедеятельности. Целью работы является формирование фотокаталитически активных наногетероструктур в видимом диапазоне электромагнитного излучения.

Одним из наиболее перспективных, экологически чистых и недорогих способов борьбы с загрязнениями сточных вод является их очистка с использованием современных окислительных процессов, таких как гетерогенный фотокатализ под воздействием УФ и видимого света.

Фотокаталитическая технология привлекла большое внимание из-за того, что чистая и возобновляемая солнечная энергия может быть использована для химического разложения загрязняющих веществ на простые оксиды.

Среди этих материалов широко изучается ZnO, поскольку он нетоксичен и легко синтезируется [1-4].

Основным механизмом фотокатализа является следующий: Образующиеся электронно-дырочные пары ( $e^-/h^+$ ) вступают в реакцию с адсорбированными молекулами (например, водой, кислородом, гидроксильными группами) с образованием окислительных радикалов. Эти окислительные вещества (радикалы) участвуют в разложении загрязняющих веществ.

### Принцип действия фотокатализатора



Рис. 1. Основы фотокатализа

Однако неспособность поглощать видимый свет, и быстрая рекомбинация фотогенерированных пар  $e^-/h^+$  являются двумя основными проблемами, которые необходимо преодолеть, чтобы использовать металлооксидные полупроводники в качестве фотокатализаторов видимого диапазона.

ZnO демонстрирует подходящие оптические и электронные свойства, высокий окислительно-восстановительный потенциал, нетоксичность и низкую стоимость. Особое внимание он получил благодаря своей экологичности, термической и химической устойчивости. Однако из-за широкой запрещенной зоны ( $E_g = 3,1-3,32$  эВ) фотоотклик фотокатализаторов ZnO на солнечное излучение все еще очень слабый.

В работе проведен синтез материалов на основе ZnO разными методами. Получение гидрогеля  $Zn(OH)_2$  с последующим переводом его в наночастицы ZnO с помощью термообработки при температуре  $350^\circ\text{C}$  в течение четырех часов. Формирование стержней ZnO в результате химической реакции при гидротермальном синтезе при температуре  $85^\circ\text{C}$  [5-7]. Получение  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  проведено сольвотермическим методом с использованием  $\text{FeCl}_3$  и этилового спирта [8].

Синтез материала на основе  $ZnO\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , с целью сдвига фотокаталитической активности в область видимого диапазона, также был проведен сольвотермическим методом, схожим с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , но с добавлением ZnO до термического воздействия.

Наиболее распространенным в природе фотокаталитическим процессом является, который осуществляется под действием видимого света. Солнечно-стимулируемый фотокатализ считается эффективным способом решения проблемы нехватки энергии и загрязнения окружающей среды. В связи с этим были предприняты различные

экспериментальные попытки методом проб и ошибок по получению высокоэффективных фотокатализаторов, однако узкий диапазон чувствительности видимого света и низкая квантовая эффективность фотокатализаторов по-прежнему ограничивают их разработку и практическое применение. В последние десятилетия различные теоретические исследования были сосредоточены на искусственном создании высокоэффективных фотокатализаторов, что ускоряет развитие этой области. Как правило, ценный фотокатализатор должен одновременно отвечать как минимум трем фундаментальным требованиям: высокой эффективности поглощения света в видимом диапазоне, сильной фотокаталитической активности и высокой стабильности фоторезиста. Однако все они часто конфликтуют друг с другом и их трудно примирить. Например, чтобы улучшить каталитические характеристики, каталитические центры должны быть достаточно активными, что часто делает активные центры неспособными противостоять структурной деформации, вызванной легкой коррозией или термическим нарушением. Более того, некоторые катализаторы наночастиц обладают очень высокой начальной каталитической эффективностью, в то время как каталитическая активность быстро снижается из-за их плохой стабильности. Чтобы преодолеть эту проблему, полупроводниковые материалы широко используются в области фотокатализа благодаря присущим им преимуществам, таким как их ультратонкая слоистая структура, большая удельная площадь поверхности, высокая плотность поверхностных активных центров и превосходные механические свойства. Таким образом, полупроводниковые наноматериалы имеют широкие перспективы применения в качестве фотокатализаторов. Гетерогенные переходы, образованные путем укладки различных материалов, не только обеспечивают более широкий диапазон поглощения солнечного света, но и способствуют специальному разделению фотогенерированных носителей, тем самым привлекая огромный интерес для фотокаталитического применения [9-12]. В работе синтезируется композитный материал  $\text{ZnO-Fe}_2\text{O}_3$  обладающий гетеропереходом, который помимо разделения носителей, смещает поглощение оксида цинка, с ультрафиолетового диапазона в видимый.

### **Исследование ширины запрещенной зоны полученных материалов**

С целью изучения полученных материалов в работе, спектры оптического поглощения перестраивали в координатах Тауца. С помощью такого графика определяется ширина запрещенной зоны. Первым исследуемым материалом был  $\text{ZnO}$ , полученный из гидрогеля  $\text{Zn(OH)}_2$ .

Экстраполируя линейный участок (край собственного поглощения) на ось энергий, мы можем судить о ширине запрещенной зоны исследуемого материала. Для  $\text{ZnO}$  это значение составляет 3,08 эВ.

Вторым рассматриваемым материалом был  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , полученный сольвотермическим процессом. Таким же образом определим ширину запрещенной зоны  $\text{Fe}_2\text{O}_3=2.27$  эВ.

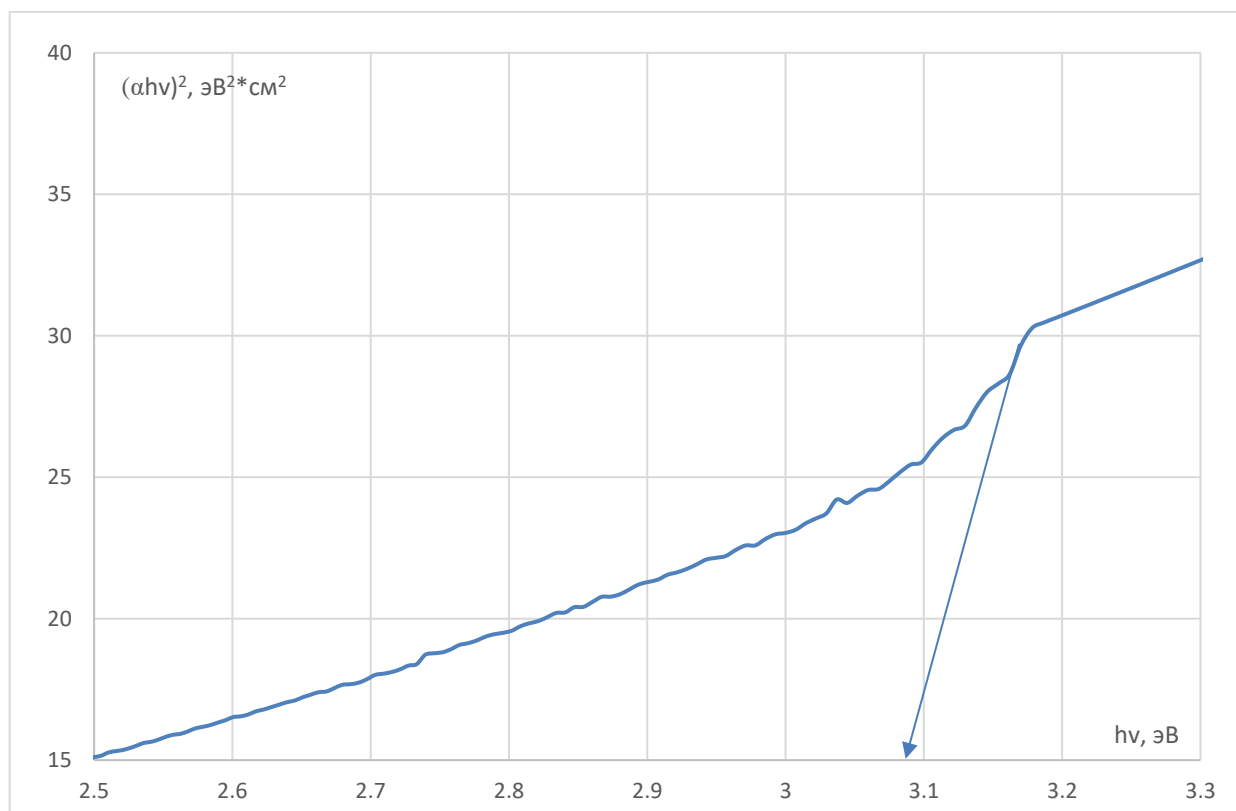


Рис. 2. Спектроскопия ZnO.

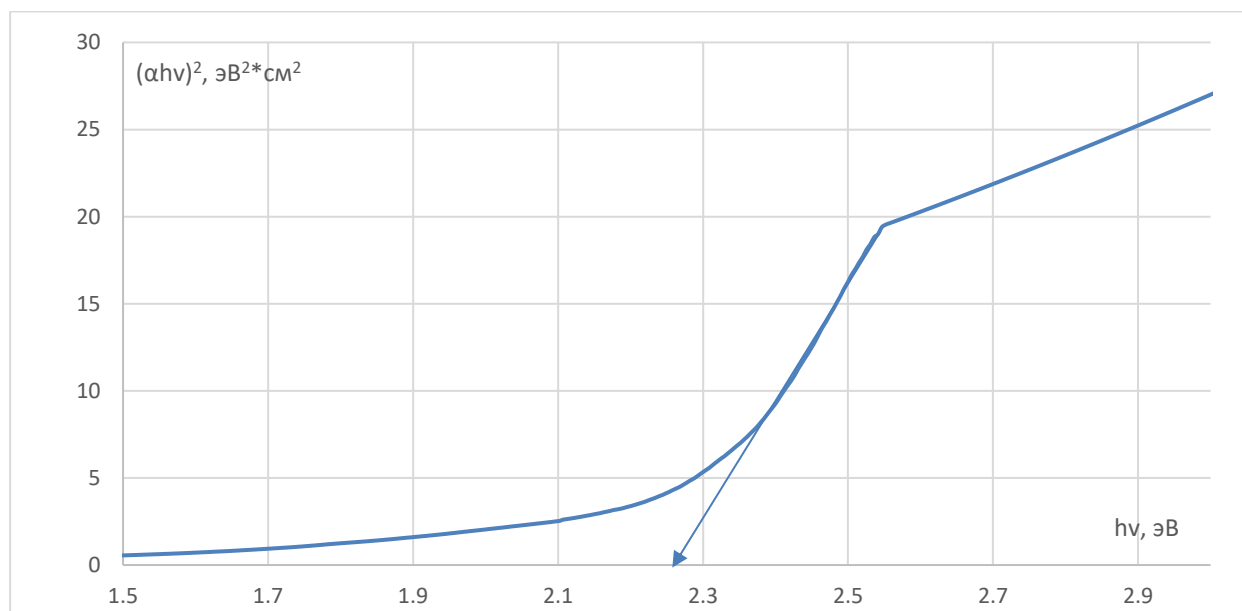


Рис. 3. Спектроскопия  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### Заклучение

В данной работе проведен синтез материалов в системе оксида цинка-оксида железа. Полученные результаты показывают, что система перспективна для создания фотокаталитических материалов, функционирующих в оптическом диапазоне.



Гетероструктура на основе оксида цинка будет обладать такой же сильной фотокаталитической активностью, но поглощение из ультрафиолетового диапазона, с шириной запрещенной зоны 3.08 эВ, будет смещено в сторону видимого, благодаря оксиду железа с меньшим значением ширины запрещенной зоны- 2.27 эВ. Создание композита на рассматриваемых материалах способствует специальному разделению фотогенерированных носителей под действием электрического поля гетероперехода, привлекая еще большее внимание в части фотокаталитического применения.

### Список литературы

1. Синтез наноструктур на основе оксида цинка для создания гетероструктурных фотовольтаических элементов / Лашкова Н.А., Максимов А.И., Рябко А.А., Бобков А.А., Мошников В.А., Теруков Е.И. // ФТП. 2016, Т. 50. №. 9. С. 1276-1282.
2. Исследование свойств оксида цинка методом импедансной спектроскопии./ Кедрук Е.Ю., Бобков А.А., Гриценко Л.В., Мошников В.А. // Физика и химия стекла, 2022, Т. 48, № 2, стр. 170-179
3. Бобков А.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Сомов П.А., Теруков Е.И. Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 10. С. 1402-1406.
4. Двухэтапный синтез структурированных микросистем из наностержней оксида цинка с использованием ультразвукового спрейпиролиза и низкотемпературного гидротермального метода / Рябко А.А., Максимов А.И., Вербицкий В.Н., Левицкий В.С., Мошников, В.А., Теруков Е.И. // ФТП. Т.54. вып. 11. С. 1251- 1257.
5. Рябко А.А., Максимов А.И., Мошников В.А. Гидротермальный синтез для управляемой самосборки иерархических покрытий на основе оксида цинка с воспроизводимой формой наностержней // Вестник НовГУ. 2017. №6(104). С. 32-37
6. Formation of Surface Conductivity of Zinc Oxide Nanorods / Ryabko A.A., Mazing D.S., Bobkov A.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. Т. 9396356. С. 1176–1179.
7. Лашкова Н.А., Пермяков Н.В., Максимов А.И., Спивак Ю.М., Мошников В.А. Анализ локальных областей полупроводниковых нанообъектов методом туннельной атомно-силовой микроскопии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки №1 (213). 2015. С. 31-42.
8. S. M. R. Shariatzadeh, M. Salimi, H. Fathinejad, A. Hassani Joshaghani, Nanostructured  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Solvothermal Synthesis, Characterization, and Effect of Synthesis Parameters on Structural Properties, International Journal of Engineering, Transactions C: Aspects, Vol. 35, No. 06, (2022) 1186-1192
9. SYNTHESIS PECULIARITIES OF PHOTOCATALYTIC MATERIALS BASED ON ZINC OXIDE / Anikina M.A., Maximov A.I., Gagarina A.Y., Kirillova S.A. // В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022. С. 1006-1009.
10. PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF ZNO/CUO HETEROSTRUCTURES / Levkevich E.A., Moshnikov V.A., Maximov A.I., Yukhnovets O. // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. 2019. С. 777-779.
11. PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF ZINC OXIDE BASED HETEROSTRUCTURES / Yukhnovets O., Maximov A.I., Semenova A.A., Nalimova S.S. // В сборнике: 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. 2018. С. 113-117.
12. Юхновец О.И. ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА // В сборнике: ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ. Материалы XIX Международной научно-практической конференции имени профессора Л.П. Кулёва студентов и молодых ученых. Томский политехнический университет. 2018. С. 164-165.

## СОЗДАНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ ЗА СЧЕТ СОЧЕТАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

МАТВИЕНКО В.А, ТАРАСОВ А.С, ДЕГТЕРЕВ А.Э, ЛАМКИН И.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Разработаны технологические режимы создания перовскитной пленки  $\text{MAPbI}_2\text{Br}$  комбинированием процессов центрифугирования и термического напыления. Сочетание методик позволило получить гибридные составы с заданными характеристиками, параметры которых исследовались методами пропускания и фотолюминесценции.

*Ключевые слова:* перовскит, термическое испарение, центрифугирование

В настоящее время возможности кремниевых солнечных элементов достигли технологического потолка, поэтому ученые в области солнечной энергетики уже давно разрабатывают альтернативные материалы, которые способны полностью его заменить, одним из вариантов решения этой проблемы стали перовскиты. Они представляют собой соединения с общей формулой  $\text{ABX}_3$ , где А – однозарядный катион, В – двухзарядный катион металла, а Х – галогенид-ион. У перовскитов существует множество полезных свойств: высокий квантовый выход фотолюминесценции, высокая подвижность и большая диффузионная длина носителей заряда, высокое поглощение в видимой области. Всё это позволяет использовать эти соединения в оптоэлектронике, в частности при создании активных слоев фоточувствительных структур.

В работе рассмотрены различные технологические решения для нанесения слоёв перовскита, а также проведён эксперимент по созданию перовскитных структур с использованием метода термического испарения и центрифугирования.

Центрифугирование является одним из наиболее простых и распространенных методов приготовления тонких пленок. На подложку помещается определенное количество раствора, держатель вместе с подложкой может быть статичен, или вращаться с небольшой угловой скоростью (Рис.1). Дальнейшее ускорение увеличивает центробежную силу, которая равномерно распределяет раствор по поверхности. Во время вращения происходит интенсивное испарение жидкой фазы из слоя. Выбор растворителя также очень важен, более высокая летучесть приводит к получению толстых пленок, из-за этого охлаждающий эффект становится преобладающим, что приводит к неоднородностям.

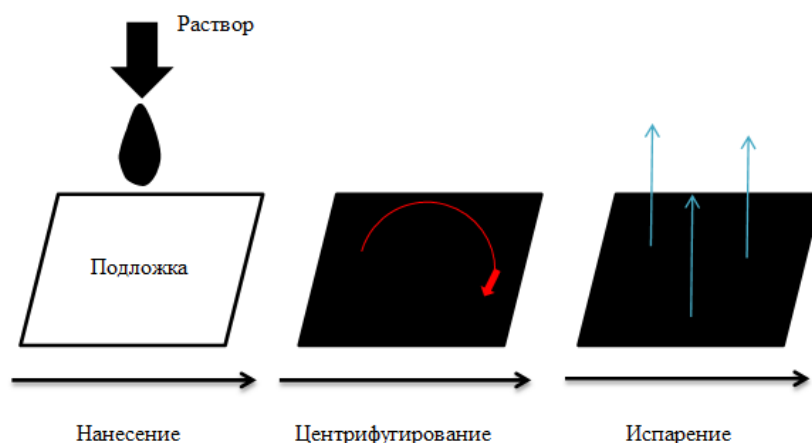


Рис. 1. Схематичное изображение метода центрифугирования

На результат процесса центрифугирования влияют: угловая скорость, физические свойства раствора, температура, скорость воздушного потока и относительная влажность.

Парофазный метод основывается на обработке органического материала парами неорганического, это позволяет получать перовскиты с широкой запрещенной зоной, примером которого является  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ . Данный перовскит может быть использован для создания каскадных солнечных элементов, в качестве фронтального гетеропереходного элемента [1].

При парофазном осаждении из двух источников в отдельные тигли помещается  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{I}$  и  $\text{PbCl}_2$ . Подложка устанавливается на держателе, который направлен стороной с ФТО покрытым  $\text{TiO}_2$  вниз к источникам (Рис.2).

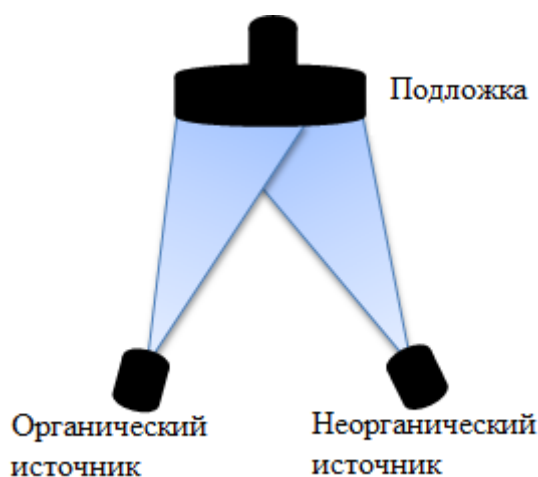


Рис. 2. Схематичное изображение парофазного метода

Тонкопленочный материал может быть нанесен методами на основе пара или раствора. Техника осаждения из паровой фазы обычно выполняется в вакуумной камере без растворителей и может быть определена как сухой процесс. Напротив, метод осаждения на основе раствора называется мокрым процессом. В зависимости от методов получения галогенидов свинца и органических галогенидов двухэтапные методы можно разделить на четыре категории:

1) Мокрый + Мокрый: Металлические и органические галогениды осаждаются из раствора. Они являются наиболее широко распространенными и изученными двухэтапными методами.

2) Мокрый + сухой: Пленки галогенидов металлов осаждаются из раствора, а затем преобразуются в фазу перовскита с помощью методов осаждения из паровой фазы.

3) Сухой + мокрый: Пленки галогенидов металлов готовятся путем осаждения из газовой фазы, например, термического испарения или сублимации в закрытом пространстве, а затем преобразуются в перовскиты путем реакции с органическими галогенидами, полученными из раствора.

4) Сухой + сухой: Пленки галогенидов металлов и органических галогенидов наносятся осаждением из газовой фазы [2].

Для экспериментального исследования была выбрана методика сочетания термического испарения и центрифугирования, так как эта технология наиболее перспективна среди остальных.

VASP (vapor assisted solution process) это модифицированный двухстадийный последовательный процесс. При этом методе формирование пленки начинается с создания неорганического каркаса перовскитного материала осаждением из раствора. Затем на неорганический каркас воздействуют органическими парами, и в результате химической реакции между органическими и неорганическими прекурсорами образуется перовскитная пленка (Рис.3). VASP использует кинетическую реактивность органических паров и термодинамическую стабильность перовскита в процессе роста кристаллов в месте осаждения. Следовательно, преимуществом этой технологии является включение органических компонентов в неорганический каркас, что предотвращает высокую скорость роста перовскита в процессе одновременного осаждения прекурсоров, а также возможную деградацию неорганического каркаса при погружении в органический раствор. Таким образом, VASP позволяет получать перовскитные пленки с полным покрытием подложки, малой шероховатостью поверхности и четко определенным размером зерен вплоть до микро размеров [1].

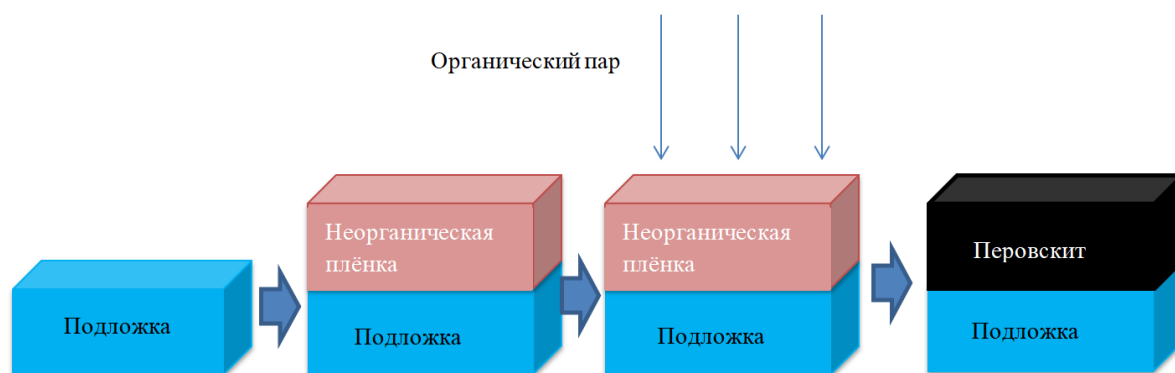


Рис. 3. Схематичное изображение метода VASP

Для получения экспериментальных образцов была выбрана структура стекло/FTO/МАРbI<sub>2</sub>Br. Первым шагом для получения этой структуры было нанесение слоя PbI<sub>2</sub> методом центрифугирования и дальнейший отжиг полученной структуры (стекло/FTO/PbI<sub>2</sub>). Для этого 740 мг PbI<sub>2</sub> растворили в 1,5 мл диметилформамида (DMF), далее полученный раствор был нанесен центрифугированием на подложку, а после подвергнут отжигу при 100 °С.

Вторым шагом было напыление. 200 мг порошка бромид метиламмония CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>Br (МАBr) напылялись при температуре 170 °С в течение 50 минут. В результате реакции с PbI<sub>2</sub> была получена структура стекло/FTO/МАРbI<sub>2</sub>Br.

В ходе проведенного исследования были получены графики поглощения, пропускания и интенсивность фотолюминесценции, край поглощения и пик ФЛ соответствуют длине волны 722 нм, ширина запрещенной зоны 1,72 эВ, что характерно для кубической кристаллической структуры перовскита МАРbI<sub>2</sub>Br [3]. ( $E_g = h/\lambda$ ,  $E_g$  - ширина запрещенной зоны,  $h$  – постоянная Планка,  $\lambda$  – длина волны).

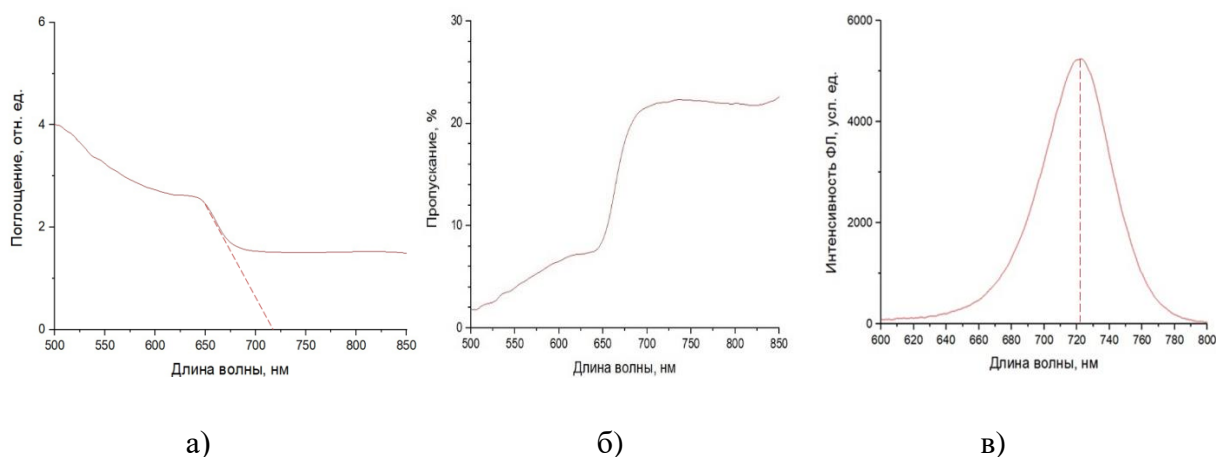


Рис. 4. Характеристики экспериментального образца (а – Поглощение, б – Пропускание, в – Интенсивность ФЛ)

## Закключение

Был проведен анализ различных методик нанесения перовскитных пленок, среди которых исследованный экспериментально метод центрифугирования и термического испарения является наиболее перспективным. Анализ спектров поглощения и фотолюминесценции подтвердил образование кристаллической структуры перовскит. Метод VASP позволяет получать перовскиты сложного состава с малым количеством дефектов, так как процесс взаимодействия прекурсоров происходит более медленно по сравнению с другими методами.

## Список литературы

1. М. Насируддин, М. Василопулу. Перовскитные солнечные элементы. 3-й ежегодный доклад Ассоциации "Глобальная энергия". С. 20–48
2. Zhifang Wu, Enbing Bi, Chongwen Li, Lei Chen, Zhaoning Song, Yanfa Yan// RRL Solar 2022 // Том 7 вып. 1
3. López, C. A., Alvarez-Galván, M. C., Martínez-Huerta, M. V., Fauth, F., и Alonso, J. A. Crystal structure features of  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Br}_x$  hybrid perovskites prepared by ball milling: a route to more stable materials //CrystEngComm. – 2020. – Т. 22. – №. 4. – С. 767-775.

## PECULIARITY OF THE FORMATION OF DROPLET IN THE FLOW REACTOR

MBWAHNCHE R.C.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет organization

<sup>2</sup>Air force institute of technology (AFIT), Kaduna, Nigeria

**Abstract.** This work describes the peculiarity of the formation of droplets in flow reactor synthesis. In order to achieve the droplet formation several parameters are considered. This includes the pump construction, the mixer construction, the stepping mode of the stepper motor, the size of syringes used, the diameter of channel, the nature of the fluid and the velocity of the droplets form. A measurement setup using light spectra and a mathematical model to calculate the volume per seconds of the precursors, the velocity and volume of droplets formed and also of the carrier fluid are described. These calculated values are used as variables in the feedback

loop for the control of the flow reactor. The necessity for precise formation and manipulation of droplets is to study and understand the physicochemical dynamics of the synthesis of colloidal nanoparticles.

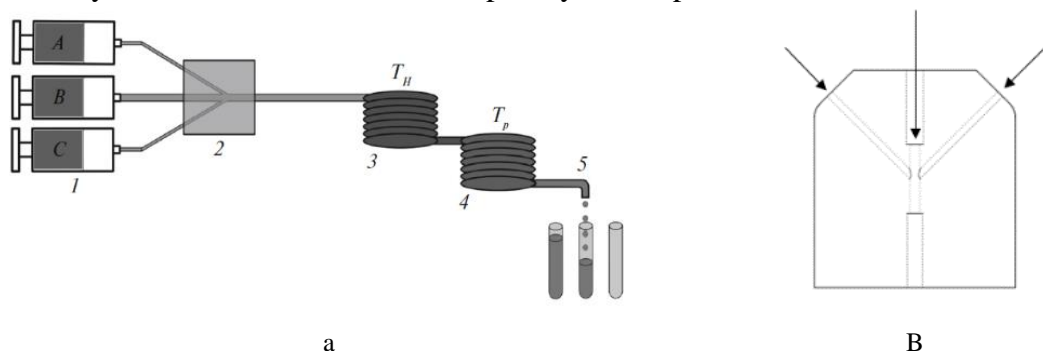
*Key words: segmented flow reactor, colloidal synthesis, automation*

This work is a continuation of the research that has been done in our laboratory for over 8 years [1-7].

The hot-injection method is the most commonly used and has been used to synthesis various types and shapes of quantum dots that are of high quality, defect-free and monodispersed. However, the resulting product is strongly affected by the system parameters such as initial temperature of both solvents, the injection rate, stirring efficiency, concentration of the reactant materials, length of time the mixture is held at the reaction temperature, the efficiency of the cooling both after injection and in quenching the reaction after the desired product is achieved. Most of these parameters stated above are difficult to control with precision in a chemical flask and this can lead to poor reproducibility of the product and polydispersity in particle size and low emission quantum yield.

The flow reactor synthesis is an alternative to resolve the difficulties stated above. The apparatus consists of a pump component for continuously supplying pressure to the reactant or precursor mixture or carrier fluid to the millimetre capillary reaction tube which is optically transparent and heat conducting, a mixing module which is located at the beginning of the reaction tube, a heat transfer medium in thermal contact with the reaction tube, a monitoring unit to evaluate, measure or detect the properties of the product such like droplet volume, droplet speed, optical, magnetic and electromagnetic properties, a control loop to adjust the reaction condition such as temperature of the heating module, flow rate of the reaction mixture in the tube to correct any discrepancy between the detected value and predetermined target range.

The general working principle of synthesizing colloidal nanoparticles in microreactor is as follows: precursors are introduced into microchannel where they mix and then the process of nucleation and growth take place under a given temperature and finally the final product is either analyzed in situ or is harvested for post synthesis process.



*Fig. 1. Schematic diagram of a flow reactor: a(1) syringe pumps, (2) mixing module, (3) nucleation module, (4) growth module and (5) selection of nanoparticles. b mixer*

This paper focus on the peculiarity of drop formation in flow reactor synthesis of colloidal particles. In order to achieve the droplet formation several parameters are considered. This includes the pump construction, the mixer construction, the stepping mode of the stepper motor, the size of syringes used, the size of channel, the thickness of channel.

**Pump construction :** the pump is a modular construct which was manufactured using additive manufacturing of PLA using 3d printer. At one end is the stepper motor which is connected to a threaded rod . Syringes of different sizes can be mounted on the base construct and with the

rotation of the stepper motor, the syringe is pushed inward to put pressure to the liquid into the capillary.

Stepper motor setting: the stepper motor used has stepping degree of 1.8 degrees and requires 200 full steps to make a complete rotation. However, since the capillary is in the 1mm diameter, micro stepping is used in order to fully control the amount of liquid being pushed into the capillary. The stepper motor is controlled with a stepper motor driver drv8825 which capable of 1/8, 1/16, 1/32 micro stepping

Speed calculation with syringes: in order to calculate this, various parameter that are required: pitch P, of the rod driven by the stepper motor, volume V, of liquid required, step mode of the stepper motor M, and steps per second S. A full step requires 200 number of steps, half step -400, 1/4 steps -800, 1/8 steps - 1600 and 1/16 steps -3200. The pitch for the rod is 1mm – meaning after one full rotation, depending on the step mode, the rod would have covered a distance of 1mm. The syringes used ranged from 1ml, 5ml, 10ml, 15ml 20ml. and their respective inner diameter were 4.7mm, 12.3mm, 15.6mm, 17mm, 20.1mm. A LabVIEW command is used to set the speed by setting the steps per seconds. To achieve the steps per second, the user will have to specify the volume (um) per seconds. This value is given and the step per seconds is calculated using the following calculation  $S = \frac{V * M}{\pi * r^2 * P}$ . With this calculation, one can ascertain the amount of a specific precursor going into the mixer per seconds.

Mixer construction and size : To achieve proper mixing and droplet formation, a mixer is required. Mixer can be active or passive. In this work the passive mixer is used. There are 3 types of configurations for designing mixer. The common types of flow reactor mixers: a – focused flow channel, b –Y-shape channel, and c –T-shaped channel. The present paper describes the implementation of the upgraded Y-shape mixer. Two side capillary inlets meant for two precursors and the middle inlet for the liquid carrier altogether forming a Ψ-shaped mixer.

The mixer was designed in solid works and the generated Geber code was used to fabricate the two halves of the mixer on a PMMA substrate. The diameter for the centre channel is 2mm. The capillary goes through the channel 5.5mm from the entrance and the outlet. Two channels meet the centre channel at 45 degree, and their diameter are 1.2 mm which is enough to host the needles that delivers the two precursors. The micro channel are drilled out using a 0.1mm drill bits and the mixer is cut out of the slap using a 1mm drill bit.

Bonding of the mixer is performed with the use of adhesive. After mounting the capillary and the needles on the lower substrate, adhesive is applied to keep them bonded for 1 min. After that, the upper part of the mixer is laid over the bonded structure and the clamped for several mins. To achieve air-tight bonding the bonding surfaces are sand papered slightly before bonding. The resultant fabrication is shown in figure A. Each channel is fed from syringe that are mounted on the pump.

The mixing and droplet formation take place due to the interaction of the three fluids . The design is such that the centre channel is the carrier fluid and its diameter is larger than the other two. This helps to keep the pressure and directs the flow toward the outlet. The smaller channels exert more pressure and prevent backflow of the reacting precursor.

The size of the micro channels also affects the rate of mixing. since the carrier liquid is viscous. A smaller diameter can cause high pressure and glugging of the channel. However, experiment was carried out in a 0.8mm channel and above so as not to experience sudden fouling of the mixer and to avoid backward pressure into the syringe pump.



It is preferably that the carrier fluid does not mix with the reacting fluid and that the speed of the fluid is greater. The higher the speed the smaller the reacting volume of the precursors since it cuts through the mixing precursors at higher frequency.

Velocity measurement with absorption spectra: a set up to measure the absorption spectra of the droplet form is used to measure the velocity of flow of the droplets. This consist of a 2mm channel through which the capillary passes through. On two adjacent sides of the device is a light source and on the opposite sides are TEMT6000 ambient light sensors that measure the intensity of light that passes through the droplets. The size of the light hole is 1mm and the distance between the two holes is 1mm apart. The working principle is able to detect difference even in colourless liquids depending on the density of the liquids. By measuring the analogue signal of the sensor, it can be seen that in the presence of a droplet the signal drops since less light rays get transmitted to the other side and then sensed by the sensor. By plotting this graph against time, the duration of which the droplets passes through the light hole, the velocity, volume and the frequency through at which each of the droplets passes can be used to calculated.

The graph below show the reading of the sensor with a specific time range. The trough signifies the presence of droplet while the crest signifies the absence of droplet.

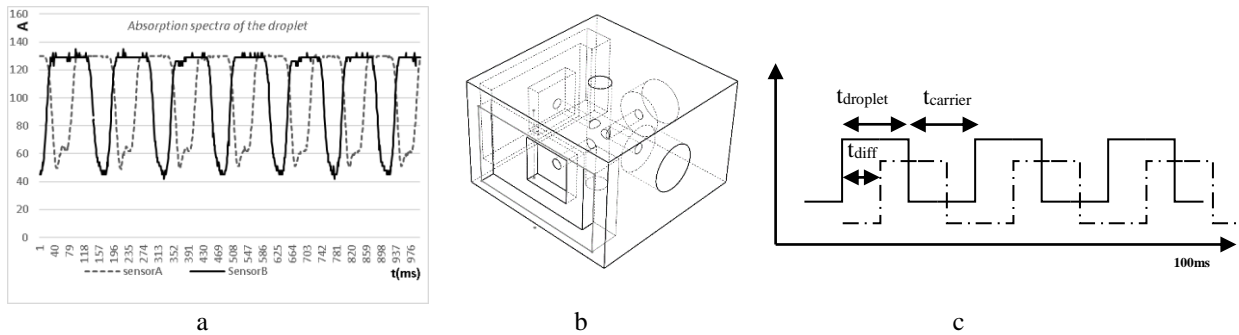


Fig.2. (a) Absorption spectra of the droplet. (b) device setup for measurement (c) graphical model of measurement.

To calculate the volume of the reacting mixture, the following steps are carried out: distance between the two holes  $d_{holes} = 1mm$ . An interrupt is set to measure the rising or falling edge of the droplet in order to get the timing interval between the falling or rising waveform formed  $t_{diff}$ , the droplet pulse  $t_{droplet}$  and the carrier fluid time pulse  $t_{carrier}$ . The velocity of the droplets is as follows  $v_{droplet} = d_{holes}/t_{diff}$ . Given the above parameters, the volume of the droplet  $V_{droplet} = 2 * \pi * r^2 * l_{droplet}$  where  $l_{droplet} = v_{droplet} * t_{droplet}$ ,  $r$ , radius of channel and the frequency of droplet flow  $f_{droplet}$  which is the number of droplet per seconds can be calculated. The same calculations can be done for the carrier liquid using the carrier pulse time  $t_{carrier}$ , the carrier liquid velocity  $v_{carrier}$  and volume  $V_{carrier}$ . Using the volume of each droplet, a selection mechanism can be set to dispose patches of droplet that are not within the desired volume or droplets that were not formed or to detect the case of continuous flow. With a servo motor placed at a specific distance, the faulty droplets can be led into a different part through a locking mechanism. Also, having calculated the volume of each droplet, the speed of the pumps can be regulated to achieve certain velocity or volume autonomously.



## Conclusion

Parameters required for droplet formation and manipulation in a segmented flow reactor are described. The formula used to determine the volume per seconds of the precursor and hence the speed of the pump is also described. Using a measuring setup that detect the amount of light and with the aid of a mathematical model, the velocity, volume and frequency of the droplets can be measured and a selection mechanism is used to discard not properly formed droplet. These developments in flow reactor synthesis have been implemented in the Nanomaterials laboratory of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",

## References

1. Development of flow reactor for the synthesis of semiconductor and metal nanoparticles. Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A., Matyushkin L.B., Mbwanche R., Ryzhov O.A. Университетский научный журнал. 2015. № 15. С. 13-21.
2. Synthesis of quantum dot nanocrystals and plasmonic nanoparticles using a segmented flow reactor. Mbwanche R.C., Matyushkin L.B., Ryzhov O.A., Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A. Optics and Spectroscopy. 2017. Т. 122. № 1. С. 48-51.
3. Segmented flow reactor for synthesis of quantum dot nanocrystals and plasmonic nanoparticles. Mbwanche R.C., Matyushkin L.B., Ryzhov O.A., Aleksandrova O.A., Moshnikov V.A. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 741. С. 012026.
4. Controlling of immiscible liquids fluid in a capillary reactor - from continuous to segmented flow. Matyushkin L.B., Mbwanche R.C., Ryzhov O.A. Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 769. № 1. С. 012035.
5. Electric circuit solutions for flow reactor synthesis of nanoparticles. Mbwanche R.C., Aleksandrova O.A., Ryzhov O.A., Mazing D.S., Moshnikov V.A. В сборнике: Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ELCONRUSW 2016. 2016. С. 71-74.
6. Investigation of the conductive properties of ZnO thin films using liquid probes and creation of a setup using liquid probes again for studying the conductive properties of thin films. Permiakov N., Maraeva E., Bobkov A., Mbwanche R., Moshnikov V. Technologies. 2023. Т. 11. № 1. С. 26
7. Автоматизированный проточный микрофлюидный реактор для синтеза коллоидных нанокристаллов Мбванче Р.К., Мазинг Д.С. В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XIII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2023. С. 215-216.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА МЕТОДАМИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

ГАЛЯКБАРОВ Р.И., МЕЛКОНЯН Г.Э.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Проведен обзор возможностей сканирующей зондовой микроскопии. Целью работы является определение характеристик оксида цинка при исследовании локальной области материала, полученного методом магнетронного распыления. Проведена серия измерений электрических и механических свойств и сравнение их с теоретическими данными. При обработке результатов использовалось программное обеспечение Gwyddion. Также была получена толщина пленки путем выжигания лазером канавки в образце и последующем получении АСМ-снимка, по которому был исследован рельеф поверхности.

*Ключевые слова:* сканирующая зондовая микроскопия, оксид цинка, микроскопия сопротивления растекания, силовые кривые

Исследования методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания (SSRM) является одним из основных методов исследования наноматериалов и наноструктур. Этот метод позволяет изучать электропроводность тонких слоев материала с высоким разрешением. Принцип работы SSRM заключается в том, что

электропроводящий зонд находится в постоянном контакте с поверхностью образца и к нему прикладывается напряжение, после чего регистрируется проходящий через образец ток [1,2,10].

Силовые кривые в АСМ – это графики зависимости силы взаимодействия между зондом и поверхностью образца от расстояния между ними. Интерпретация данных кривых может дать информацию о механических свойствах поверхности образца, таких как жесткость, эластичность и вязкость [3].

Целью данной работы является получение изображений: картирование сопротивления или напряжения по поверхности; и физических параметров тонких пленок оксида цинка: жесткость, сила адгезии, модуль Юнга.

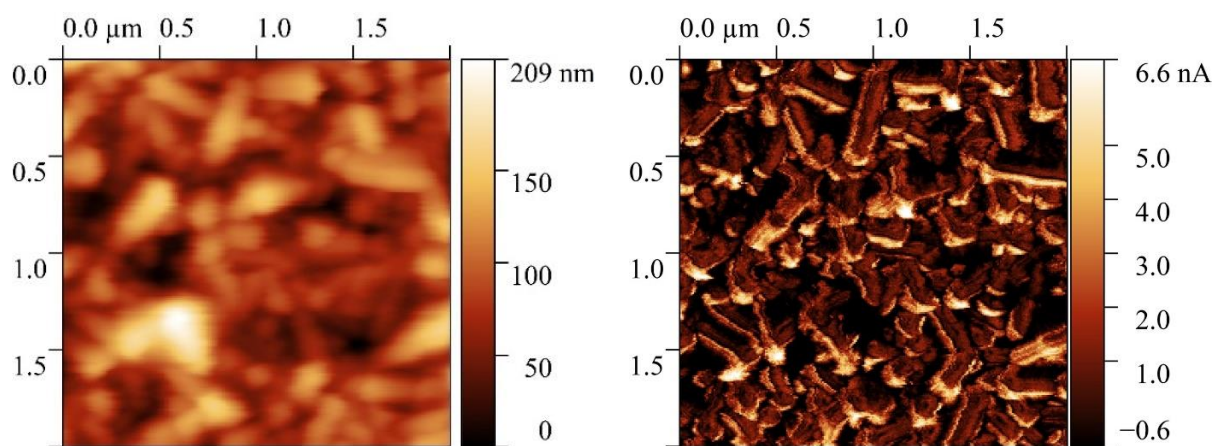


Рис. 1. Рельеф поверхности (слева) образца ZnO на подложке FTO, полученный спрей пиролизом и распределение тока (справа) на поверхности. Приложенное напряжение – 5 В

Измерения проводились на АСМ NTEGRA Therna, использовались следующие серии зондов: DCP11, HA\_NC-Pt, CSG01 и NSG01/TiN. Последующая обработка данных проводилась в ПО Gwyddion: фильтрация изображений, получение профиля поверхности и интерпретация силовых кривых [9].

На рис.1 представлены результаты измерений методом SSRM тонкой пленки оксида цинка. В одной из точек было измерено ВАХ образца и рассчитано сопротивление, которое оказалось равно  $12.2 \cdot 10^6$  Ом, что коррелирует с теоретическими данными [4,6,7].

Одним из этапов работы было снятие силовых кривых в точке. По полученным кривым можно определить механические параметры тонкой пленки оксида цинка. Одним из важных параметров являются коэффициент жесткости и сила адгезии [8].

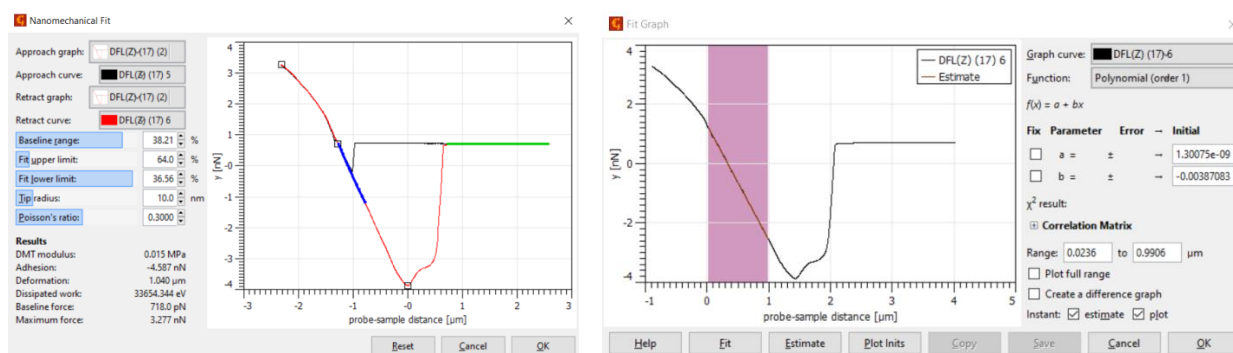


Рис. 2. Окно программы Gwyddion с открытым модулем «Nanomechanical fit» (слева) и окно модуля «Fit Graph» (справа)

Извлечение данных о механических свойствах образца проводится модулем «Nanomechanical fit» в ПО Gwyddion. Расчет параметров производится следующим образом: «Адгезия рассчитывается как сила между минимальным значением на кривой отвода и средним значением на выбранной части базовой линии. Деформация соответствует длине части, соответствующей отталкиванию, на кривой подвода, т.е. она является расстоянием между положением, в котором сила стала равна нулю после того, как произошел перескок в режим контакта и положением максимальной силы. Абсолютная величина DMT (модуля Юнга в модели Derjaguin-Muller-Toporov) определяется аппроксимацией выбранной части кривой отталкивания» [5].

Таблица 1

**Механические параметры, полученные из рассмотрения силовых кривых**

№	1	2	3	4	5	Среднее значение
Модуль Юнга, МПа	0,015	0,017	0,018	0,019	0,017	0,017
Адгезия, нН	4,587	4,594	4,691	4,764	4,845	4,696
Деформация, мкм	1,040	1,043	1,060	1,024	1,075	1,048
Жесткость, Н/м	0,00387	0,00404	0,00409	0,00428	0,00412	0,00408

Расчет коэффициента жесткости производился вычислением тангенса угла наклона кривой отвода в области ослабления прижима зонда к поверхности. Производился расчет аппроксимирующей линейной функции, коэффициент при аргументе которой и являлся численным значением тангенса угла наклона. Аппроксимация производилась в программной среде Gwyddion модулем «Fit Graph». Полученные данные сведены в Таблицу 1.

Следующим пунктом работы было определение толщины слоя оксида цинка. На материал воздействовали лазерным излучением, проделав канавку на поверхности, при этом не затронув слой подложки. По полученным данным, построив профиль поверхности (Рис.3) в Gwyddion, толщина нанесенного слоя оказалась равна порядка 1,5 мкм.

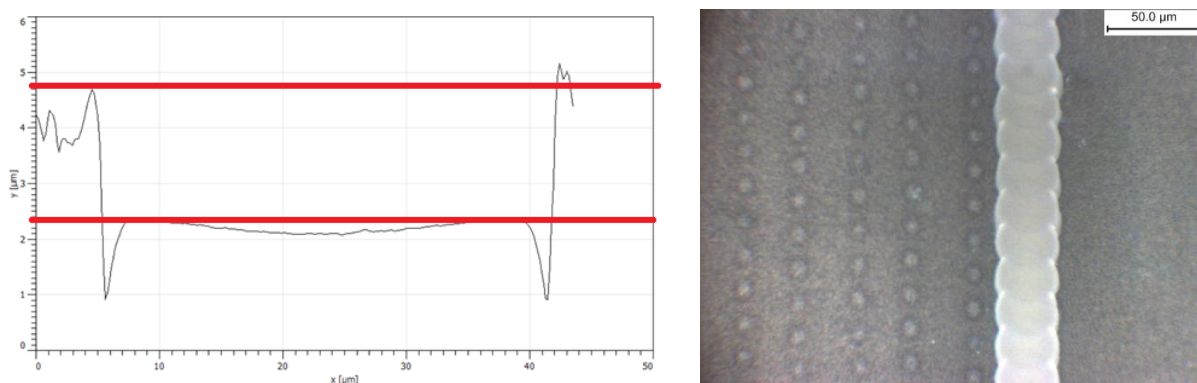


Рис. 3. Профиль поверхности образца ZnO (слева) и вид в оптическом микроскопе канавки, отожженной лазером (справа)

Таким образом, в результате проведенных измерений показаны основные особенности сканирующей зондовой микроскопии. Проведенные измерения показывают, что данный метод позволяет извлечь множество полезной информации о синтезированном материале для последующего его использования в микро- и нанoeлектронике. Определение толщины нанесенных слоев рассмотренным способом является задачей, требующей последующей интерпретации данных и обработки, поскольку прямое измерение является некорректным вследствие наличия дефектов на границе структур и искажений при измерении.

### Список литературы

1. В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, Н. В. Пермяков. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
2. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений //Новг.: Институт физики микроструктур. – 2004.
3. Силовая спектроскопия / [Электронный ресурс] // NT-MDT: [сайт]. — URL: <https://www.ntmdt-si.ru/resources/spm-principles/afm-spectroscopies/force-distance-curves> (дата обращения: 20.02.2024).
4. Пешкова Т. В. и др. Структуры из нанопроводов с переходами Zn-ZnO: CuO для детектирования паров этанола //Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84. – №. 5. – С. 143-148
5. Klapetek P., Necas D., Anderson C. Gwyddion user guide //Czech Metrology Institute. – 2004. – Т. 2007. – С. 2009.
6. ZnO Nanobridges and Nanonails / J. Y. Lao [et al.] // Nano Letters. — 2003. — Feb. 1. — Vol. 3, no. 2. — P. 235—238.
7. Özgür Ü. et al. A comprehensive review of ZnO materials and devices //Journal of applied physics. – 2005. – Т. 98. – №. 4. – С. 11
8. Анкудинов А. В. Диагностика наноустройств методами сканирующей зондовой микроскопии //Иоффе, СПб. – 2015.
9. AFM Probes & Accessories Catalogue / [Электронный ресурс] // NT-MDT SI Probes shop : [сайт]. — URL: [https://www.ntmdt-tips.com/data/media/nt-mdt-si\\_afm\\_probes.pdf](https://www.ntmdt-tips.com/data/media/nt-mdt-si_afm_probes.pdf) (дата обращения: 26.04.2023).
10. Wang L. Carrier profiling of ZnO nanowire structures by scanning capacitance microscopy and scanning spreading resistance microscopy: дис. – Université de Lyon, 2016.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА

МИРОШКИНА В.В.<sup>1</sup>, ГУКЕТЛОВ А.М.<sup>2</sup>, ШОМАХОВ З.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004, Нальчик

**Аннотация.** С каждым годом полупроводниковые газовые датчики становятся все более актуальны в промышленной сфере, медицине и пищевой индустрии. Одними из наиболее распространенных являются полупроводниковые резистивные газовые датчики. Однако, стабильность их работы значительно ухудшается в присутствии в атмосфере водяных паров. Цель данной работы состоит в разработке метода улучшения свойств датчиков с помощью жертвенного легирования нанопроволок оксида цинка и контроля содержания дефектов (кислородных вакансий) в приповерхностном слое.

*Ключевые слова:* оксид цинка, газовый датчик, нанопроволоки, кислородные вакансии, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, дефекты

Одним из широко распространенных газочувствительных материалов является оксид цинка (ZnO). Это широкозонный полупроводник n-типа проводимости, обладающий высокой биосовместимостью, экологической безопасностью, химической стабильностью и низкой стоимостью [1]. В основе работы газовых датчиков лежит процесс обратимой хемосорбции активных газов на поверхности полупроводниковых оксидов, способствующий обратимому изменению их проводимости. Это происходит вследствие изменения концентрации электронов в зоне проводимости из-за обмена носителями заряда с адсорбированными из газовой фазы частицами. Различие проводимостей полупроводникового резистивного слоя в отсутствие и при наличии газа-реагента в окружающей среде несет информацию о концентрации детектируемого газа. Отклик сенсора к детектируемому газу можно определять по отношению максимального сопротивления образца в воздухе к максимальному сопротивлению образца в присутствии целевого газа. Однако, когда датчики работают в окружающей среде, водяной пар может конкурентно адсорбироваться на поверхности металлооксидной структуры. Химическая адсорбция молекул воды непосредственно изменяет базовое сопротивление металлооксидного датчика, что приводит к снижению чувствительности к целевому газу.

Для улучшения свойств сенсора разрабатываются газочувствительные слои с перколяционной структурой [2] и гидрофильными областями, получаемые жертвенным легированием металлооксидной структуры, в результате чего появляются кислородные вакансии. Данная работа нацелена на разработку методик жертвенного легирования для контролируемого формирования поверхностных структур дефектов на нанопроволоках из оксида цинка.

Были синтезированы подложки двух типов. Первоначальные наночастицы оксида цинка первого типа формировались с помощью золь-гель метода [3]. В качестве прекурсоров были выбраны гексагидрат нитрата цинка ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) и тетраэтоксисилан (ТЭОС). Наночастицы второго типа синтезировались на сенсорной платформе из водного раствора ацетата цинка. После центрифугирования полученные слои отжигались при 350°C.

На затравочных слоях гидротермальным синтезом формировались нанопроволоки оксида цинка. Он проводился в эквимольном водном растворе гексаметилентетрамина  $C_6H_{12}N_4$  и гексагидрата нитрата цинка  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . Также были синтезированы

образцы из растворов, в которые дополнительно были добавлены йодид натрия NaI или бромид натрия NaBr, соответственно [4]. Слои нанопроволок ZnO выращивались в течение одного часа при 86°C. Следующим этапом был отжиг при температуре 350°C в течение 30 минут.

Морфология поверхности структур оксида цинка на основе ацетата цинка была изучена с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Химический состав поверхностных слоев исследовали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Для возбуждения фотоэмиссии использовалось монохроматическое излучение Al-K $\alpha$ . РФЭС-спектр показал, что пики, соответствующие цинку, кислороду и углероду наблюдались у чистых и легированных образцов. Проанализированные спектры уровней O1s показали, что добавление NaI и NaBr для жертвенного легирования приводило к значительному увеличению содержания кислорода, соответствующего кислородным вакансиям или поверхностным гидроксильным группам.

Исследование сенсорных свойств синтезированных наноструктур проводилось на специальном измерительном стенде [5]. Установка позволяет отслеживать изменение сопротивления образца при подаче воздуха и газа-реагента. В исследовании газами-реагентами выступают пары изопропилового спирта, ацетона, этанола и воды. Измерения проводились при температуре 250°C.

В результате исследования было обнаружено, что среди образцов первого типа максимальный отклик проявляет сенсорный слой, полученный с добавлением NaI, при детектировании паров этанола. Образцы на основе ацетата цинка продемонстрировали увеличение отклика при подаче этанола. Анализ воздействия водяных паров показал, что образцы второго типа почти не реагируют на их присутствие. В то же время отклик образцов первого типа к парам воды сопоставим с откликом к парам органических растворителей. Результаты исследования могут представлять интерес для разработки датчиков перколяционного типа [6] с дополнительными площадками для улавливания водяного пара. Такая конструкция является перспективной для повышения стабильности газовых датчиков в условиях повышенной влажности.

### Список литературы

1. Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A., Nalimova S.S., Semenova A.A., Maksimov A.A., Levkevich E.A., Moshnikov V.A. Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018. Proceedings. 2018. P. 219-221.
2. Мошников В.А., Налимова С.С., Селезнев Б.И. Газочувствительные слои на основе фрактально-перколяционных структур // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 11. С. 1535-1539.
3. Чудинова Г.К., Наговицын И.А., Гаджиев Т.Т., Данилов В.В., Мошников В.А., Налимова С.С., Кононова И.Е., Курилкин В.В. Флуоресценция пленок наноразмерных композитов ZnO : SiO<sub>2</sub> и SnO<sub>2</sub>:SiO<sub>2</sub> под действием сывороточного альбумина человека // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 2. С. 174.
4. Nalimova S., Shomakhov Z., Bobkov A., Moshnikov V. Sacrificial doping as an approach to controlling the energy properties of adsorption sites in gas-sensitive ZnO nanowires // Micro. 2023. V. 3. N. 2. P. 591-601.
5. Рябко А.А., Бобков А.А., Налимова С.С., Максимов А.И., Левицкий В.С., Мошников В.А., Теруков Е.И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 758-764.
6. Бобков А.А., Пронин И.А., Мошников В.А., Якушова Н.Д., Карманов А.А., Аверин И.А., Сомов П.А., Теруков Е.И. Формирование литографических рисунков ограниченными микрочастицами оксида цинка на кремниевой подложке // Письма в Журнал технической физики. 2018. Т. 44. № 15. С. 87-92.

## **АНАЛИЗ СОСТАВА ЭФФЛЮЕНТА ПЕРИТОНЕАЛЬНОГО ДИАЛИЗАТА С ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ХИМИЧЕСКОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ГЕЛЬ-ХРОМАТОГРАФИИ С УФ-ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ И ОПТИЧЕСКОЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

МИХАЙЛИС М., ОВСЯННИКОВ Н.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)»*

**Аннотация.** Данная статья посвящена исследованию эффлюента перитонеального диализата с помощью доступного и компактного оптико-электронного химического сенсора и флуоресцентной спектроскопии. В работе проводится сравнение экспериментально полученных спектров поглощения и флуоресценции отдельных фракций с литературными данными для качественного определения веществ, входящих в состав выводимого из организма диализата.

*Ключевые слова:* эффлюент, поглощение, флуоресценция, конечные продукты гликирования (КПГ).

### **Введение**

При хронической болезни почек (ХБП) происходит прогрессирующее снижение почечной функции. Это, в свою очередь, приводит к накоплению в крови жидкости и вредных конечных продуктов обмена веществ. Перитонеальный диализ – это заместительная терапия, которая основывается на фильтрации крови через перитонеальную мембрану, частично имитирующую здоровую почку. Важнейшим компонентом данной терапии является очищающая жидкость – диализат, – который представляет собой изотонический водный раствор электролитов и осмотического агента (глюкозы). Во время лечения его вводят в брюшную полость, где он поглощает балластные метаболиты и избыточную жидкость из кровеносных сосудов за счёт процессов диффузии и осмоса. Заключительный этап лечения включает в себя выведение раствора – эффлюента из брюшной полости через катетер.

Определение продуктов обмена веществ и белковых соединений в эффлюенте играет важнейшую роль в своевременном выявлении возможных осложнений, связанных с продолжительной диализной терапией. В частности, наличие глюкозы в составе диализата способствует образованию конечных продуктов гликирования (КПГ) в организме. Как следствие, их появление разрушает структуру и функциональность белков. Результатом этого процесса является усиление окислительного стресса в организме [1].

### **Материалы и метод**

Основным хроматографическим методом разделения компонентов диализата по молекулярной массе выступает быстрая жидкостная хроматография (БЖХ) белков и метаболитов. Крупные молекулы, благодаря своим размерам, проникают сквозь поры гелевой матрицы и быстро выводятся свободным объемом буфера, в то время как молекулы меньшего размера, проникая в поры, выводятся с некоторой задержкой.

Для исследования были проанализированы 20 остаточных проб перитонеального диализата, предоставленных отделением диализа СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница». Из них для анализа были отобраны 5 проб, имеющие явные отличия в спектрах флуоресценции.



**Оптико-электронный химический сенсор.** Прибор собран из хроматографической колонки PD-10 гелевым наполнителем Sephadex G25, кварцевой кюветы, УФ-светодиода (излучающего на длине волны 285 нм), солнечно-слепого фотоприёмника и электронного модуля. Сенсор подробно описан в работе [2].

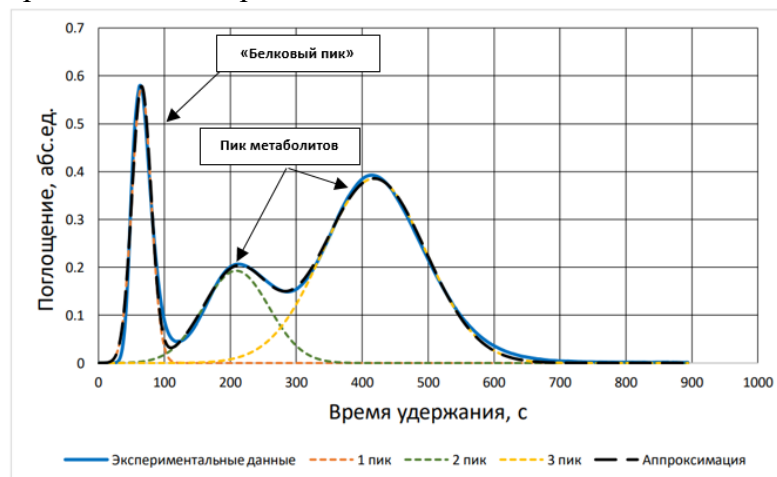


Рис. 1. Пример хроматограммы, аппроксимированной функцией Гаусса

Как видно по рисунку 1, хроматограмма эфлюента состоит из 3 пиков. С помощью химического сенсора было проведено фракционирование диализата с целью разделения и последующего детектирования веществ, характерных каждому пику.

Наличие белков в первом пике эфлюента было замечено и описано в работе [3]. Интерес вызывают вещества, проявляющие себя во втором и третьем пиках. Предположительно, второй пик ассоциируется со свободными нуклеотидами и с конечными продуктами гликирования (AGE), а третий – с пуринами и пиримидинами. Для подтверждения этой гипотезы были записаны УФ-спектры поглощения и спектры флуоресценции диализата. В интервале длин волн 235-245 нм находятся максимумы поглощения мочевины, мочевой кислоты и продуктов деградации альбумина [4]. Нуклеотиды поглощают на длине волны 260 нм. В диапазоне 295-300 нм происходит поглощение продуктов распада триптофана – хинолиновая, пиколиновая и феруловая кислота.

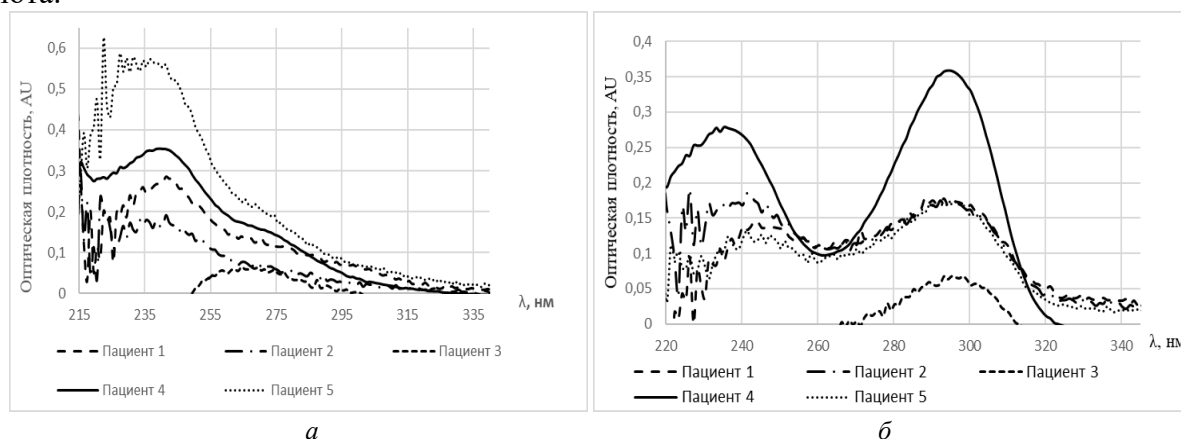


Рис. 2. Спектры поглощения эфлюента 2 пика (а) и 3 пика (б)

На спектрах флуоресценции для 2 пика, представленных на рисунке 3а, видно, что при длине волны возбуждения  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  нм максимум расположен на  $\lambda_{\text{флуор}} = 411$  нм. В свою



очередь, по теоретическим данным [5] продукт конечного гликирования весперлизин С флуоресцирует на длине волны  $\lambda=405$  нм при  $\lambda_{\text{возб}}=345$  нм.

На рисунке 3б изображены 2 максимума -  $\lambda_{\text{флуор}} = 425$  нм и 449 нм. Первый пик можно связать с наличием никотинамида ( $\lambda_{\text{возб}} = 360$  нм,  $\lambda_{\text{флуор}} = 428-430$  нм), а второй пик указывает на наличие в составе КПП – гликированного альбумина ( $\lambda_{\text{возб}} = 370$  нм,  $\lambda_{\text{флуор}} = 440$  нм) [5]. Также флуоресценция весперлизины А и В определена на длине волны возбуждения/испускания 366/342 [5]. Следовательно, можно предположить их присутствие во 2 пике.

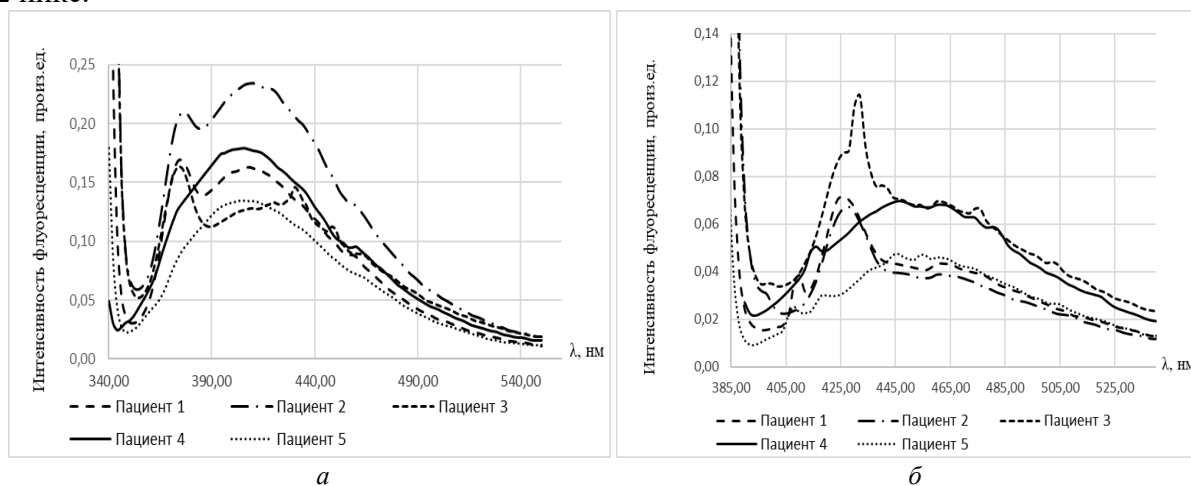


Рис. 3. Спектры флуоресценции эффлоента 2 пика на  $\lambda_{\text{возб}} = 330$  нм (а) и  $\lambda_{\text{возб}} = 370$  нм (б)

Максимум флуоресценции -  $\lambda_{\text{флуор}} = 374$  нм, изображенный на рисунке 4а, совпадает с данными для гликированного альбумина на длине волны возбуждения  $\lambda_{\text{возб}} = 335$  нм [6]. Попадание данного соединения в 3 пик можно охарактеризовать возможным перекрытием 2 и 3 пика при фракционировании (рис.1).

Второй максимум расположен на  $\lambda_{\text{флуор}} = 450-452$  нм. Мочевина полностью соответствует данному диапазону длин волн, так как при возбуждении на  $\lambda_{\text{возб}} = 366$  нм она флуоресцирует на длине волны  $\lambda_{\text{флуор}} = 450$  нм [6].

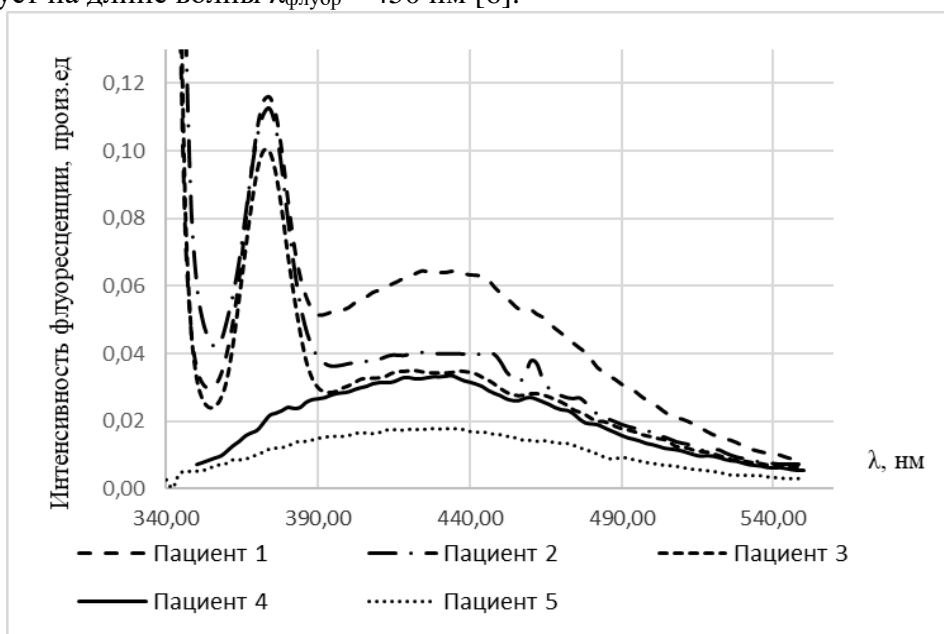


Рис. 4. Спектр флуоресценции эффлюента 3 типа на  $\lambda_{возб} = 330$  нм

### Заключение

В данной работе было проведено исследование компонентов, присутствующих в эффлюенте перитонеального диализата. Результаты анализа, основанного на фракционировании с использованием оптико-электронного сенсора, подтвердили предположение о наличии в диализате конечных продуктов гликирования (КПГ), нуклеотидов и пуринов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование метода быстрой жидкостной хроматографии с флуоресцентным анализом позволяет качественно проводить оценку различных групп анализов в жидких биологических средах.

### Список литературы

1. Maurizio Gallieni, Claudio Musetti, Antonio Granata, Laura Olivi. Metabolic consequences of peritoneal dialysis treatment. *Panminerva Medica*. 2009. №51(3). P. 175-185.
2. A. Kuznetsov, A. Frorip, Alar Sunter, V. Korsakov. Optical Chemical Sensor Based on Fast-Protein Liquid Chromatography for Regular Peritoneal Protein Loss Assessment in End-Stage Renal Disease Patients on Continuous Ambulatory Peritoneal Dialysis: *Chemosensors*, vol. 10, no. 6, p. 232, 2022.
3. Коноплев Г. А., Кузнецов А. И., V. Korsakov, Степанова О. С, Рощина Н. В., Овсянников Н. А., Лялин Д. О, Лыфарь Н. С., Герасимчук Р. П, Исачкина А. Н, Рустамова З. М, А. Frorip. Мониторинг потерь белка с перитонеальным диализатом у больных с терминальной стадией хронической почечной недостаточности: *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2024. №2. С. 44-51.
4. Кузьминова Е.В., Сампиев А.М., Семененко М.П., Абрамов А.А., Курцевич Л.В., Семененко К.А.. Молекулы средней массы как диагностический критерий развития эндотоксикоза у животных: ФГБНУ «Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии», г. Краснодар, Россия.
5. Литвинов Р.А. , Ибрагимова У.М. , Рзаева А.Ш , Соколова Е.В. , Шушакова А.И. , Валуцкий Н.В.Использование расширенного набора длин волн возбуждения/испускания при обнаружении флуоресцирующих конечных продуктов гликирования, образующихся in-vitro и in-vivo: *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2021. №4(80). С. 155-160.
6. Dipen Biswakarma, Nilanjan Dey, Deepa Bhagat, Santanu Bhattacharya. A fluorescent supramolecular host for urea: *Materials Today Proceedings*. 2019. №26(9).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ Si(100) С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Моняк А.А.<sup>1,2</sup>, Сорокина С.В.<sup>2</sup>, Кузьмин М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

**Аннотация.** В настоящей работе был впервые получен и проанализирован целый комплекс результатов, касающихся исследования поверхности Si(100)c(4×2) с помощью фотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения (50-70 meV) с применением синхротронного излучения при различных энергиях фотонов и углах вылета электронов при 100 К.

*Ключевые слова:* поверхность, кремний, синхротрон, высокое разрешение

Остовные электроны атомов в твёрдых телах, несмотря на то, что являются химически инертными, представляют существенный практический интерес при исследовании атомной структуры поверхностей и границ раздела. Их энергия связи зависит от распределения заряда в валентной зоне, которое, в свою очередь, определяется окружением атомов, поэтому измерение поверхностных сдвигов остовных уровней даёт возможность получить ценную информацию об атомной геометрии поверхностных реконструкций. Типичные сдвиги для поверхностей полупроводников и металлов составляют от 0.1 до 0.5 эВ, поэтому рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, как правило, не может быть использована для этой цели, так как естественное уширение в данном методе больше и составляет порядка 1 эВ. Исследовать такие сдвиги можно с помощью фотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения (ФЭСВР) с применением синхротронного излучения. Это интересно не только с научной, но ещё и с практической точки зрения. Так, в литературе накоплен большой объём данных, полученных для структур металл-кремний с помощью ФЭСВР, но для того, чтобы надёжно их интерпретировать, необходимо детальное понимание формы линии  $2p$ -спектров для чистой поверхности кремния. В настоящее время консенсус в этом вопросе ещё не достигнут. Поэтому в данной работе была поставлена цель восполнить (хотя бы частично) этот пробел. Кроме того, другой задачей было выяснить, как энергетическое разрешение в фотоэлектронной спектроскопии, энергия фотонов и плотность поверхностных дефектов влияют вид  $2p$ -спектров кремния. Для этого на основе полученных новых экспериментальных данных проводилось моделирование спектров.

Экспериментальные условия будут представлены в следующем виде: ( $h\nu$  – энергия фотонов,  $\theta$  – угол эмиссии). На рисунке 1 приведены примеры разложение экспериментальных Si  $2p$ -спектров. Они состоят из шести компонент (спин-орбитальных дублетов): объёмной (V) и пяти поверхностных (Su, Sd, S', C, D). Наибольшая чувствительность к поверхности наблюдается при энергии фотонов 130-135 эВ. Поэтому большой вклад в спектр дают поверхностные компоненты (Su, Sd, S', C, D). Особенно это проявляется для компоненты Su, смещённой в область меньших энергий, так как этот пик не перекрывается с объёмной, следовательно, по нему можно оценивать вклад поверхностных компонент в спектр. Можно заметить, что на рисунке 1а преобладает вклад объёмной компоненты, несмотря на достаточно большой угол эмиссии. В отличие от этого на рисунке 1б вклад объёмной компоненты становится значительно меньше и в свою очередь возрастает вклад поверхностных компонент. Это говорит о том, что энергия фотонов напрямую влияет на чувствительность поверхности и, как следствие, форму линии спектра. На основе полученных данных были поставлены задачи исследовать зависимость формы спектральной линии от энергии фотонов, энергетического разрешения (Гауссовой ширины) и от количества дефектов на поверхности.

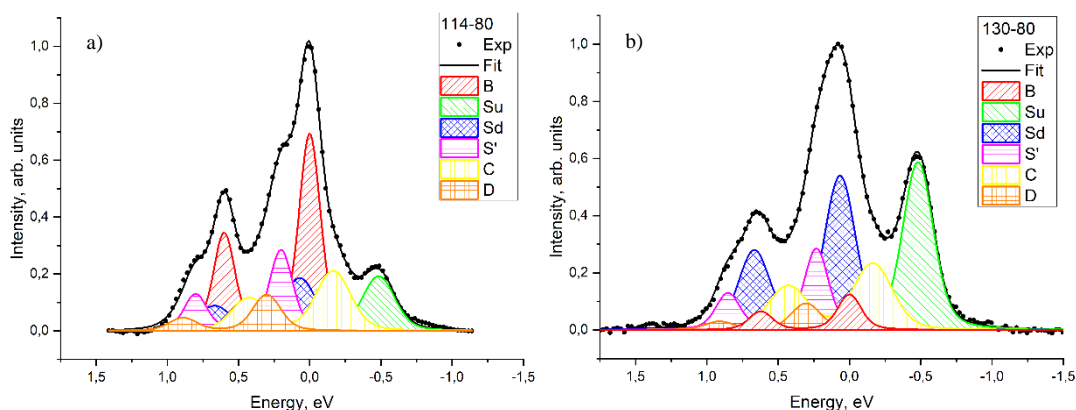


Рис. 1. Разложение фотоэлектронных спектров (114 eV, 80°) – (a), (130 eV, 80°) – (b)

С увеличением и уменьшением энергии фотонов увеличивается длина свободного пробега  $\lambda$ , а значит и вклад объемной компоненты в спектр будет расти. Визуально можно наблюдать резкий сдвиг пиков, обусловленный уменьшающимся вкладом поверхностных компонент и увеличивающимся вкладом объемной. Результаты, представленные на рис. 2 (a, b), подтверждают это.

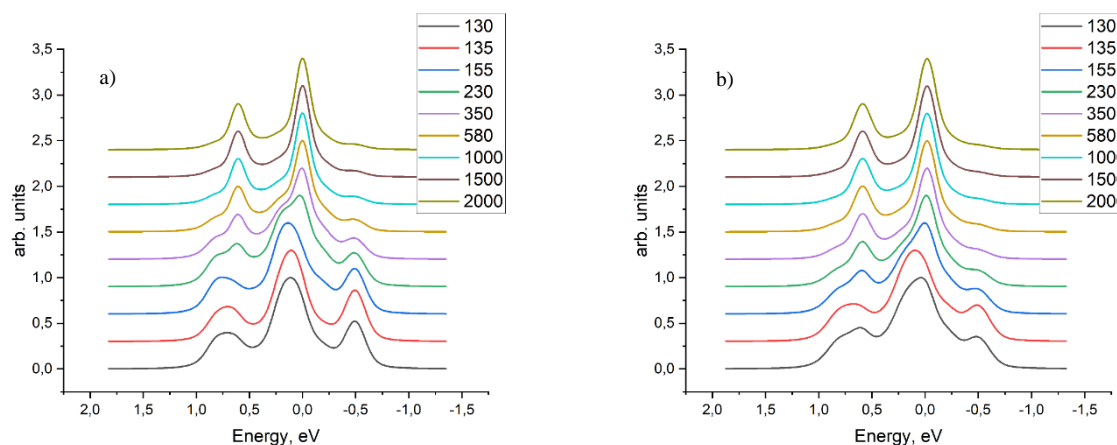


Рис. 2 Зависимость формы линии спектра от энергии фотонов при высоком разрешении (130 eV, 60°) – (a), (130 eV, 0°) – (b)

Известно, что ширина пиков обусловлена несколькими факторами: степенью неомогенности поверхности, температурой и инструментальным разрешением. Так как первые два фактора были постоянными в рамках исследования, была поставлена задача посмотреть, как инструментальное разрешение влияет на форму линий спектра. Результаты моделирования представлены на рис. 3 (a, b). Как и ожидалось, улучшение инструментального разрешения приводит к сужению ширины компонент спектра, появляется больше характерных особенностей. В свою очередь ухудшение инструментального разрешения приводит к размытию спектра, он приобретает форму, близкую к треугольной. Границы, в рамках которых варьировалось инструментальное разрешение, были выбраны таким образом, чтобы учесть влияние температурного фактора. Т. е. дальнейшее улучшение инструментального разрешения не привело бы к изменению формы линии спектра, так как основной вклад в ширину пиков стала бы вносить температура, при которой проводилось исследование.

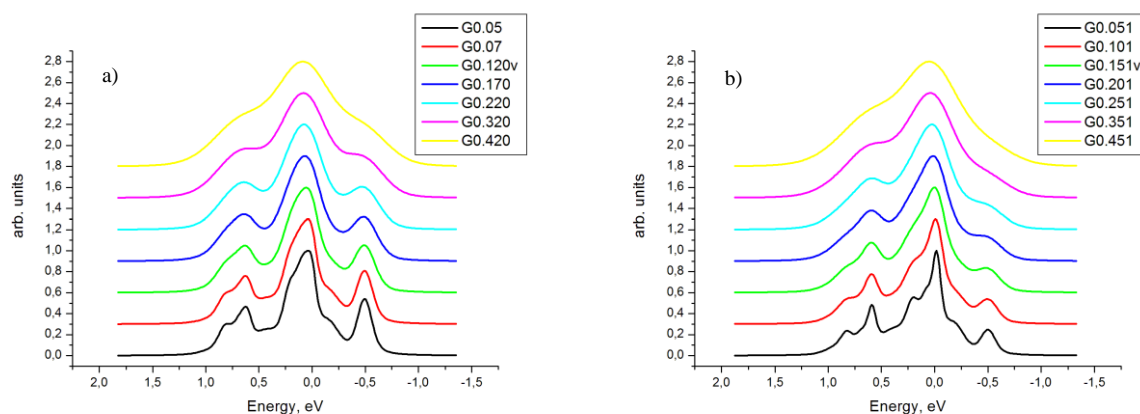


Рис. 3. Зависимость формы линии спектра от разрешения ( $130 \text{ eV}$ ,  $60^\circ$ ) – (a), ( $130 \text{ eV}$ ,  $0^\circ$ ) – (b)

Далее было рассмотрено, какое количество димеров на поверхности может быть определено при разном разрешении. Моделирование проводилось при трёх возможных инструментальных разрешениях: низком, среднем и высоком. Результаты моделирования представлены на рис. 4-6. Больше информации дают спектры, полученные при наклонной фотоэмиссии, это объясняется большим вкладом в спектр поверхностных компонент, форма линии имеет больше характерных особенностей, что подтверждается на рис. 4 и рис. 6. Стоит отметить, оценка спектров при низком разрешении также показала возможность определения количества димеров на поверхности. В дальнейшем планируется изучить этот вопрос более детально, так как это может иметь практическое значение в использовании фотоэлектронной спектроскопии при определении дефектов на поверхности.

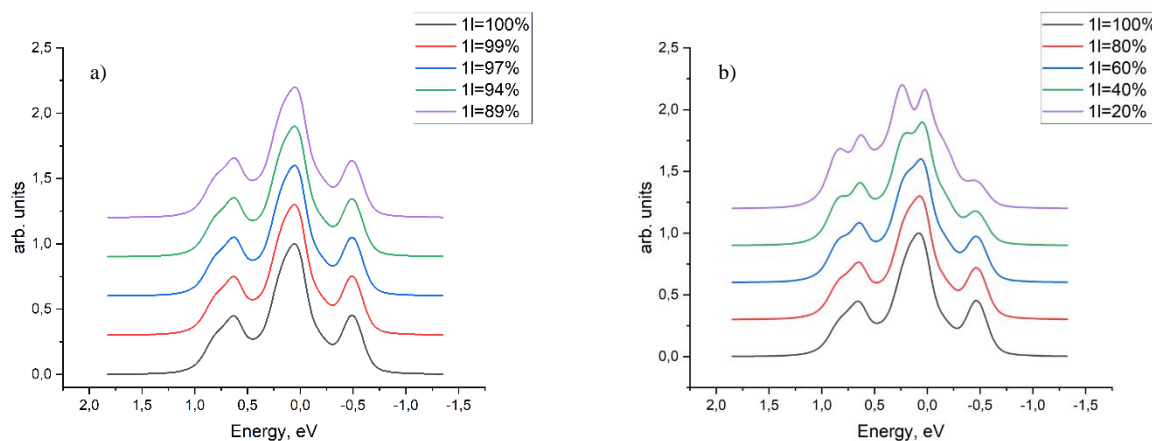


Рис. 4. Зависимость формы линии спектра от количества димеров в монослое при высоком разрешении ( $130 \text{ eV}$ ,  $60^\circ$ ) с шагом  $(i+1)$  – (a), с шагом 20 – (b)

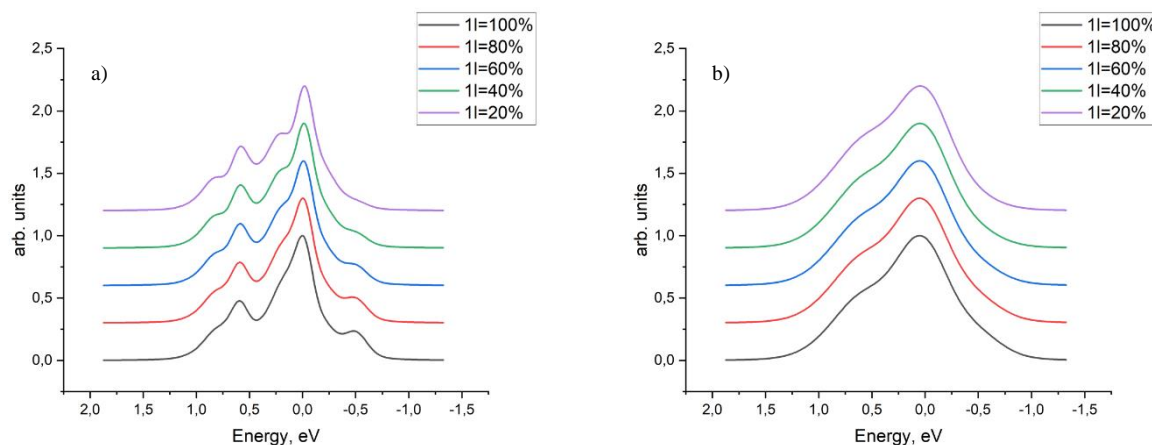


Рис. 5. Зависимость формы линии спектра от количества димеров в монослое при высоком разрешении ( $130 \text{ eV}$ ,  $0^\circ$ ) – (a), при низком разрешении – (b)

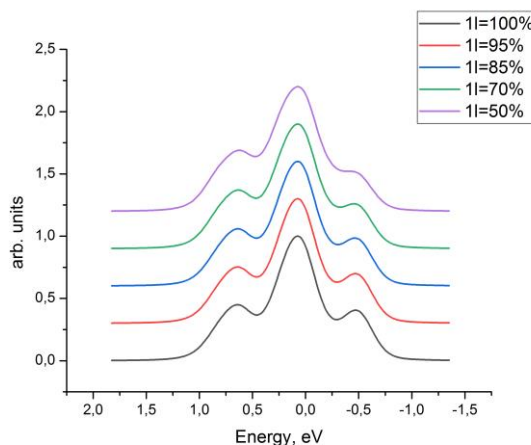


Рис. 6. Зависимость формы линии спектра от количества димеров в монослое при среднем разрешении ( $130 \text{ eV}$ ,  $60^\circ$ )

### Список литературы

1. Surface core-level shifts on clean Si(001) and Ge(001) studied with photoelectron spectroscopy and density functional theory calculations // P. Eriksson, R. Uhrberg. Physical Review B. 2010
2. Reinvestigation of the Si 2p photoemission line shape from a clean Si(001)c(4×2) surface // H. Koh, J. W. Kim, W. H. Choi, and H. W. Yeom. Phys. Rev. B 67, 073306 – Published 28 February 2003
3. Surface photoemission from Si(100) and inelastic electron mean-free-path in silicon // T.-W. Pi, I.-H. Hong, C.-P. Cheng, G.K. Wertheim // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena 107(2):163-176. 2000

## РАЗРАБОТКА СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

МОРОЗОВА Н.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В настоящее время разрабатываются двумерные наноматериалы, которые открывают новые возможности для создания микро- и нанoeлектронных устройств. Наноструктуры дихалькогенидов переходных металлов представляют интерес для разработки газовых сенсоров, работающих при комнатной температуре. Разработаны протоколы гидротермального синтеза наноструктур MoS<sub>2</sub>. Исследован сенсорный отклик синтезированных наноструктур к парам летучих органических соединений при комнатной температуре. Показано, что наноструктуры MoS<sub>2</sub> позволяют обнаруживать летучие органические соединения при измерении сигнала методом спектроскопии импеданса.

*Ключевые слова:* 2D материалы, дисульфид молибдена, спектроскопия импеданса, газовая сенсорика

В настоящее время ведутся исследования, конечной целью которых является создание миниатюрных полупроводниковых сенсоров с низким энергопотреблением и высоким быстродействием, способных определять концентрацию токсичных и взрывоопасных газов. Перспективными газочувствительными элементами такого типа являются резистивные сенсоры на основе поликристаллических металлооксидных полупроводников [1-5], некоторые виды которых уже получили практическое применение. Слоистый дисульфид молибдена (MoS<sub>2</sub>) привлек внимание в области сенсорики [6,7] благодаря обнаружению различных анализируемых веществ при комнатной температуре, высокому соотношению поверхности к объему, а также обеспечил существенные преимущества в такой сфере технологий, как гибкая электроника.

Гидротермальным методом на подложке с напыленными золотыми контактами был синтезирован сенсорный слой наночастиц дисульфида молибдена. Для этого были подготовлены водные растворы Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (0,39 М), SC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (0,75 М) и C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O (0,08 М). Затем их смешивали, причем объемное соотношение было выбрано равным 1:2:1. Когда полученная смесь становилась однородной, ее заливали в автоклав, на дно которого укладывали подготовленную подложку. Синтез проводили при температуре 200°C в течение 14 часов. После охлаждения до комнатной температуры подложки с сенсорными слоями промывали и сушили на воздухе. Перед измерением свойств сенсора образцы выдерживали в течение 2 часов при температуре 70°C.

Свойства сенсора были изучены при комнатной температуре под воздействием паров ацетона (1500 ppm), этанола (1000 ppm) и изопропилового спирта (1000 ppm). Воздух подавался в осушитель воздуха с помощью барботера. Проходя через него, поток воздуха насыщался парами целевого газа. В измерительную камеру с помощью ротаметров подавалась определенная концентрация необходимого газа. Подача воздуха и целевого газа в измерительную камеру регулировалась с помощью электромеханического клапана. Спектры сопротивления и импеданса измерялись при воздействии газа-реагента в воздушной среде. Спектры импеданса были получены в диапазоне частот от 100 Гц до 500 кГц [8-10]. Подаваемый переменный сигнал составлял 255 мВ. Сначала измеряли импеданс образца, затем подавали пары реагента в камеру и снова проводили измерение импеданса.

Было показано, что  $\text{MoS}_2$  способен обнаруживать пары восстанавливающих газов при комнатной температуре, используя действительную или мнимую часть импеданса в качестве сигнала на частотах 50-100 кГц. При этом для восстановления свойств образца необходима дополнительная термообработка при  $50^\circ\text{C}$ . Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанные слои  $\text{MoS}_2$  перспективны для создания на их основе сенсоров, способных детектировать восстанавливающие газы.

### Список литературы

1. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации / Рябко А.А., Бобков А.А., Налимова С.С., Максимов А.И., Левицкий В.С., Мошников В.А., Теруков Е.И. // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 5. С. 758-764.
2. Управление функциональным составом поверхности и улучшение газочувствительных свойств металлооксидных сенсоров посредством электронно-лучевой обработки / Налимова С.С., Мякин С.В., Мошников В.А. // Физика и химия стекла. 2016. Т. 42. № 6. С. 773-780.
3. Study of gas-sensitive properties of zinc oxide nanorod array at room temperature / Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A., Nalimova S.S., Semenova A.A., Maksimov A.A., Levkevich E.A., Moshnikov V.A. // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018. Proceedings. 2018. P. 219-221.
4. Synthesis and study of zinc oxide layers sensitized by colloidal nanocrystals / Nalimova S.S., Maximov A.A., Moshnikov V.A., Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A., Levkevich E.A., Semenova A.A. // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019. 2019. С. 223-225.
5. Technologically feasible ZnO nanostructures for carbon monoxide gas sensing / Kondratev V.M., Bolshakov A.D., Nalimova S.S. // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. P. 1163-1166.
6.  $\text{MoS}_2$ -Based Nanomaterials for Room-Temperature Gas Sensors / R. Kumar, W. Zheng, X. Liu, J. Zhang, M. Kumar // Advanced Materials Technologies. 2020. V. 5. P. 1901062.
7. A systematic review on 2D  $\text{MoS}_2$  for nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) sensing at room temperature / S. Kumar, G. Meng, P. Mishra, N. Tripathi, A.G. Bannov // Materials Today Communications. 2023. V. 34. P. 105045.
8. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors / Bobkov A., Luchinin V., Moshnikov V., Nalimova S., Spivak Y. // Sensors. 2022. V. 22. N 4. P. 1530.
9. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy / Nalimova S.S., Kononova I.E., Moshnikov V.A., Dimitrov D.Tz., Kaneva N.V., Krasteva L.K., Syuleyman S.A., Bojinova A.S., Papazova K.I., Georgieva A.Ts. // Bulgarian Chemical Communications. 2017. V. 49. N 1. P. 121-126.
10. Si nanowire-based Schottky sensors for selective sensing of  $\text{NH}_3$  and  $\text{HCl}$  via impedance spectroscopy / Kondratev V.M., Vyacheslavova E.A., Shugabaev T., Kirilenko D.A., Kuznetsov A., Kadinskaya S.A., Shomakhov Z.V., Baranov A.I., Nalimova S.S., Moshnikov V.A., Gudovskikh A.S., Bolshakov A.D. // ACS Applied Nano Materials. 2023. V. 6. N 13. P. 11513-11523.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ В ОБЛАСТИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

КОЗОДАЕВ Д.А.<sup>1</sup>, МУРАТОВА Е. Н.<sup>2</sup>, ТРУСОВ М.А.<sup>1</sup>, ЯКОВЛЕВА А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «НТ-МДТ»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** В работе описаны особенности функционирования Центра сканирующей зондовой микроскопии, открытого в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» совместно с ООО «НТ-МДТ». Выделены цели и задачи в области научного приборостроения и материаловедения, а также в области подготовки профессиональных кадров для работы в разных направлениях современной электроники.



ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

*Ключевые слова: Сканирующая зондовая микроскопия, активная метрика, нанотехнологии*

Группа компаний ООО «НТ-МДТ» проводит активную политику по развитию аналитического оборудования переходного периода научных исследований от нанотехнологии к наноархитектонике. Новые задачи требуют подготовки новых кадров.

В СПб группа компаний ООО «НТ-МДТ» открыла научно образовательные центры в Университете ИТМО и в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Работающие в Центрах сотрудники, аспиранты и магистранты выполняют актуальные исследования в области атомно-молекулярного дизайна и наноархитектоники и публикуют статьи в высокорейтинговых журналах. Примеры публикаций за последние 2 года совместно с Университетом ИТМО представлены в работах [1–3], совместно с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – в работах [4–6]

В этих центрах на уровне изобретений выполнены разработки элементов сканирующих микроскопов нового поколения [7–10]. Активно осуществляется апробация передовых идей современных научных для наномасштабных исследований [11–17].

Из перспектив развития сотрудничества ООО «НТ-МДТ» и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» стоит выделить подготовку магистров с целевой подготовкой для работы в области сканирующей микроскопии.

В печати находится лабораторный практикум (6 работ), написанный совместно сотрудниками СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ООО «НТ-МДТ», под редакцией руководителя группы компаний ООО НТ-МДТ к.ф.м.н. Козодаева Д.А. и директора Центра сканирующей микроскопии СПбГЭТУ «ЛЭТИ» доц. к.т.н. Бобкова А.А.

Целями конференции «Наука настоящего и будущего» являются вопросы ориентации современной молодежи, поэтому важной является анонсирование возможностей получения будущими магистрантами профессиональных знаний в области сканирующей зондовой микроскопии. Во время проведения конференции для заинтересованных лиц будет организована деканатом факультета электроники ознакомительная экскурсия в Центр сканирующей микроскопии.

### **Список литературы**

1. Zyrianova P.I., Eltantawy M.M., Silin D.V., et. al. Biomimetic materials based on hydroxyapatite patterns for studying extracellular cell // *Materials & Design*. 2024. Т. 238. С. 112718.
2. Aglikov A.S., Aliev T.A., Zhukov M.V., et. al. Topological data analysis of nanoscale roughness of layer-by-layer polyelectrolyte samples using machine learning // *ACS Applied Electronic Materials*. 2023. Т. 5. № 12. С. 6955-6963.
3. Rukhlyada K.A., Matytcina V.V., Baldina A.A., et. al. Universal method based on layer-by-layer assembly for aptamer-based sensors for small-molecule detection // *Langmuir*. 2023. Т. 39. № 31. С. 10820-10827/
4. Korepanov O.A., Aleksandrova O.A., Firsov D.D., et. al. Polyvinylpyrrolidone as a stabilizer in synthesis of agins2 quantum dots // *Nanomaterials*. 2022. Т. 12. № 14. С. 2357/
5. Korepanov O.A., Kozodaev D.A., Aleksandrova O.A., et. al. Temperature- and size-dependent photoluminescence of cuins2 quantum dots // *Nanomaterials*. 2023. Т. 13. № 21. С. 289
6. Мадисон А.Е., Козодаев Д.А., Казанков А.Н., и др. Аперриодическая дифракционная решетка, основанная на связи между простыми числами и нулями дзета-функции римана // *Журнал технической физики*. 2024. Т. 94. № 4. С. 658-663.
7. Козодаев Д.А., Гагарина А.Ю., Спивак Ю.М., и др. Тестовые структуры на гетероэпитаксиальных слоях PbTe(111)-on-Si со ступенчатым характером субмикронного рельефа поверхности // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2023. № 15. С. 127-134.
8. Белорус А.О., Пастухов А.И., Краснобородько С.Ю., и др. Зонд ближнепольного оптического микроскопа. Патент на изобретение RU 2731164 C1, 31.08.2020. Заявка № 2020110147 от 11.03.2020.
9. Белорус А.О., Плешанов И.М., Кошевой В.Л., и др. Установка для диффузионной сварки. Патент на изобретение RU 2809742 C1, 15.12.2023. Заявка от 24.01.2023.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

10. Козодаев Д.А., Корепанов О.А., Мошников В.А. Флуоресцентный зондовый датчик на основе ККТ систем I-III-VI // В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2022. С. 154-155.
11. Козодаев Д.А., Костромин С.В., Трусов М.А. Современные научные инструменты для наномасштабных исследований магнитных материалов // В книге: VIII Всероссийская конференция по наноматериалам. Сборник материалов конференции. Москва, 2023. С. 19-20.
12. Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. Лазерная и микроспектральная техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов // В сборнике: Невская фотоника-2023. Всероссийская научная конференция с международным участием сборник научных трудов. Санкт-Петербург, 2023. С. 29.
13. Новиков И.А., Козодаев Д.А., Мошников В.А. Исследование наноразмерных структур с использованием эффекта внутреннего трения // В книге: Физика полупроводников и наноструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника. Тезисы докладов Всероссийской научной молодежной конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 30.
14. Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А. Мультимодальный конфокальный микроспектрометр нового поколения для много-фотонных оптических экспериментов на нано-масштабе // В книге: Комбинационное рассеяние - 95 лет исследований. Тезисы докладов Российской конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам спектроскопии комбинационного рассеяния света. Москва, 2023. С. 23
15. Козодаев Д.А., Нестеров С.И., Трусов М.А. Современные научные инструменты для наномасштабных исследований ферроэлектрических материалов // В книге: XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. Тезисы. Тверь, 2023. С. 30
16. Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Погоньшев А.О., Трусов М.А. Зондово-оптическая техника нового поколения для современных наномасштабных оптических экспериментов // В сборнике: HOLOEXPO 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 125-126.
17. Мадисон А.Е., Мадисон П.А., Козодаев Д.А. и др. Аперриодическая дифракционная решетка на основе распределения нулей  $\zeta$ -функции римана // В сборнике: HOLOEXPO 2023. тезисы докладов 20-й международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям. Санкт-Петербург, 2023. С. 69-73.

## **ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ZNO НА ПОВЕРХНОСТЬ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО МНОГОЭТАПНОГО ОТЖИГА**

Мурзалинов Д.О.<sup>1</sup>, Жапаков Р.М.<sup>1</sup>, Кемелбекова А.Е.<sup>1</sup>, Бегунов М.А.<sup>1</sup>,  
Середавина Т.А.<sup>1</sup>, Чучвага Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физико-технический институт (Satbayev University)*

**Аннотация.** Исследование особенностей формирования веществ на разных уровнях иерархии структуры является перспективной задачей. Методом электрохимического травления кремния и последующего осаждения 20, 25 слоев оксида цинка методом спрей пиролиза, сформирована многоуровневая структура поверхности. Исследования методом «Box counting», выявили фрактальные свойства на макро, микро и нано уровнях сформированной поверхности. ЭПР исследования исходных образцов показали наличие сверхтонкой структуры спектра, где расщепление уровней является результатом воздействия двух различных ядер на парамагнитный центр. Наибольшая интенсивность ЭПР сигнала данного центра достигается при 8 мВт мощности СВЧ, после отжига 400 °С в атмосфере воздуха. Таким образом в процессе синтеза образцов и последующего последовательного отжига происходит значительное изменение сигнала ЭПР и проявляется сложная структура спектра.

*Ключевые слова:* фрактальная структура, уровни иерархии, парамагнитный центр, сверхтонкая структура спектра

Научно-исследовательская работа выполняется в рамках ПЦФ Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881954 по теме «Разработка технологий синтеза наноструктурированных материалов для создания эффективных фотокаталитических электродов, фото и газочувствительных сенсоров» на 2023-2025 гг.

## **Введение**

На сегодняшний день диапазон применения сенсорных технологий постоянно расширяется. Актуальным становится их использование в биологии и медицине, где требования к чувствительности и времени отклика повышенные [1].

Известно, что отклик сенсора зависит от уровня упорядоченности частиц, составляющих вещество. Если структура регулярная и уровень фрактальности высокий, то возбуждающий сигнал перемещается по поверхности образца по короткому пути, с заданной скоростью. Если присутствует локальное отклонение на пути перемещения волны, то длина пути увеличивается и длительность отклика повышается.

Иерархический пористый кремний (ПК) является перспективным материалом, реализующим адресную доставку микро и нано компонентов для их дальнейшего взаимодействия. Контроль и достижение данного результата связаны с изменением уровня пористости и инженерией поверхности вещества.

При формировании на поверхности ПК тонких слоев оксидов металлов происходит не только повышение стабильности свойств, но и увеличение уровня фрактальности. Это связано с уменьшением разброса размеров пор после формирования оксида [2]. Интерес к таким структурам обусловлен, в частности, тем, что кристаллиты оксида могут образоваться как на поверхности образца, так и на стенках каналов пор.

Целью данной работы является определение характера взаимодействия различных парамагнитных центров (ПМЦ), при формировании иерархической поверхности с тремя уровнями пористости.

Новизна исследований заключается в определении энергетической взаимосвязи частиц ZnO, образованных на разных уровнях иерархии поверхности образцов.

## **Материалы и методы**

Синтез пористого кремния был реализован с помощью метода электрохимического анодного травления. Уменьшение плотности тока  $80 \text{ mA/cm}^2$  to  $40 \text{ mA/cm}^2$  в течении 10 минут, позволило синтезировать многоуровневую иерархическую структуру. Далее на пористую поверхность методом спрей пиролиза были нанесены тонкие слои оксида цинка (20 и 25 слоев).

## **Результаты и обсуждение**

На рисунке 1 а показана макрокропористая структура, имеющая регулярный характер. Внутри макро пор образованы микро поры (1 б). Между микро порами сформированы нанокластеры вещества (1 в). При этом распределение высот, сформированных поверхностных структур равномерное (1 г).

При реализации этапов синтеза образцов, включающих отжиг между нанесениями отдельных слоев и итоговую термообработку, происходит формирование устойчивых наноструктур. Их поверхность имеет большую площадь удельной поверхности и следовательно, высокую концентрацию частиц с нескомпенсированным зарядом. В частности, вакансии кислорода при захвате электрона, образуют парамагнитные частицы (F -центры). Усиление данного процесса приводит к формированию F-п агрегатных центров. Далее этот механизм приводит к формированию кластеров вещества.

Анализ фрактальных свойств методом «Box counting», показал инвариантность структур относительно изменения масштаба на макро, микро и нано уровнях. Это связано с тем, что модули, составляющие структуру, передают ей часть своих функций, степеней свободы [47].

Рост структур в определенном направлении, имеющими заданные свойства, обусловлен характером взаимодействия между ПМЦ. Исследование данных особенностей реализовано методом спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

На спектре рисунка 2 а в середине развертки магнитного поля виден дифференциальный сигнал, по середине которого имеется отклонение от графика первой производной одиночного сигнала. Подобная сложная структура спектра является результатом взаимодействия разных ПМЦ. Уменьшая амплитуду модуляции сигнала и константу времени при измерениях, были проявлены также сигналы с более слабой интенсивностью (рисунок 2 б). Природа сигнала в центре спектра, связана со взаимодействием неспаренного электрона с двумя соседями, имеющими ядерный спин  $I = \frac{1}{2}$ . Наличие дуплетного сигнала с разными интенсивностями составляющих его компонентов, обусловлено оттягиванием электронной плотности электрона двумя различными ядрами.

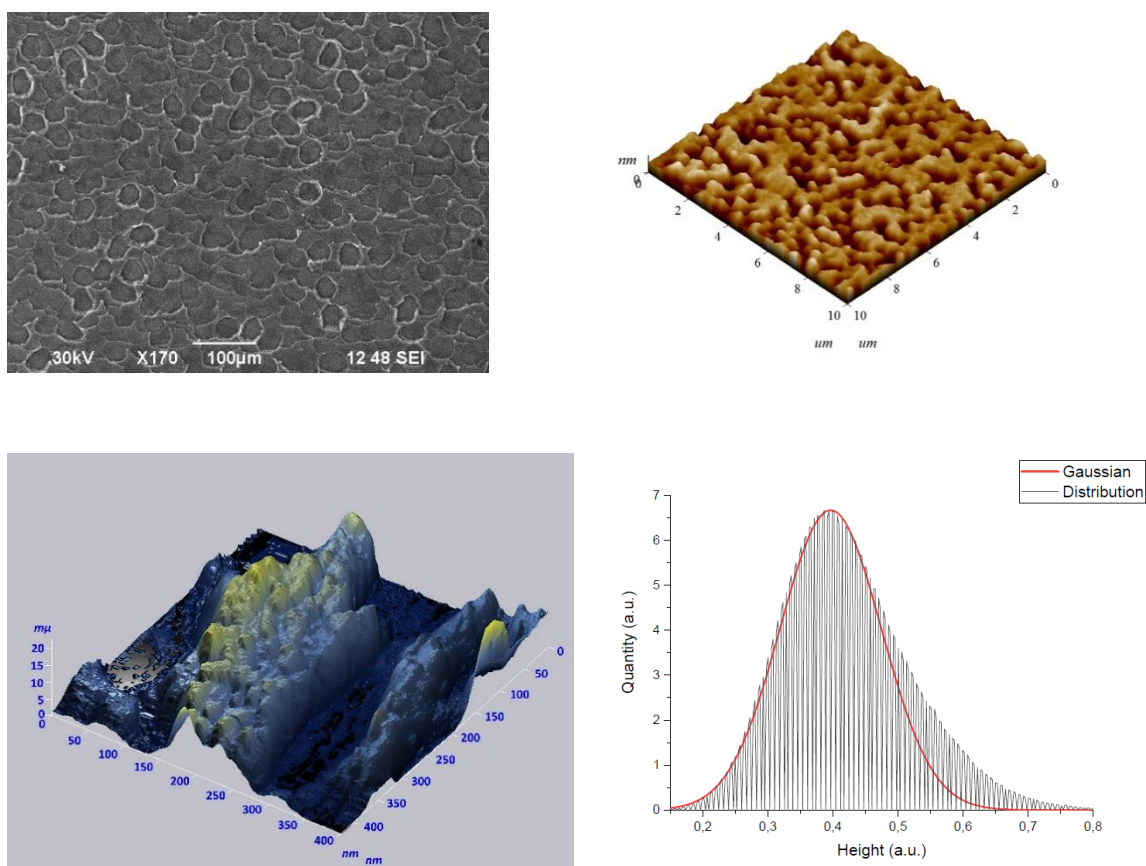


Рис. 1. А – макропористая структура образца с 25 слоями ZnO; Б - микропористая структура образца с 25 слоями ZnO; В – нанокластеры вещества, сформированные между микро порами; Г – распределение высот поверхностных структур

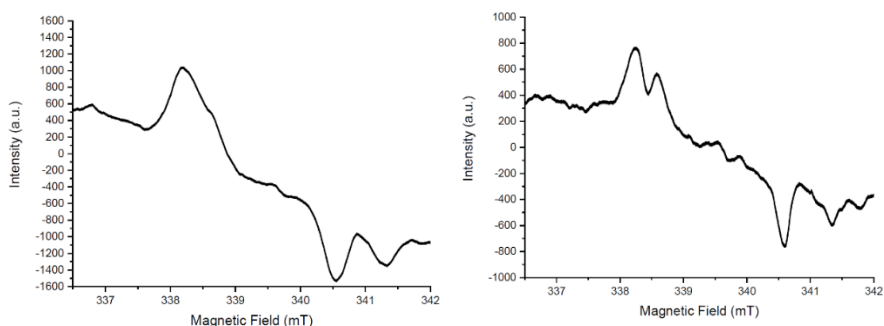


Рис. 2. Спектры ЭПР для образца с 25 слоями ZnO после синтеза: а –  $P=10$  мВт,  $A=1,6$  мТл,  $K= 800$ ; б –  $P=10$  мВт,  $A=0,6$  мТл,  $K= 1000$

Процессы отжига играют важную роль при формировании структур ZnO/ПК, независимо от способа их получения. Это особенно относится к золь–гель композитам, содержащим большое количество адсорбированных органических соединений. Таким образом, для повышения скорости реакции при образовании кристаллов оксида цинка требуется температурная обработка. При этом интерес вызывает преобразование ПМЦ при последовательном отжиге и постепенно растущей температуре (300 °С, 350 °С, 400 °С, 450 °С, 500 °С). Данный интервал температур был выбран с учетом того, что синтез происходит при 400 °С и 419 °С это температура плавления цинка.

Спектр ЭПР для каждой температуры был рассмотрен при следующих значениях мощности СВЧ – 6, 8, 10 мВт. Данный интервал был выбран исходя из предположения, что при данных значениях мощности, произойдет насыщение сигналов ЭПР.

Из спектров определено, что для каждой температуры, сигнал в центре развертки магнитного поля насыщается при мощности 8 мВт (3 а, б, в, г). Наибольшая интенсивность достигается после отжига при 400 °С (3 в).

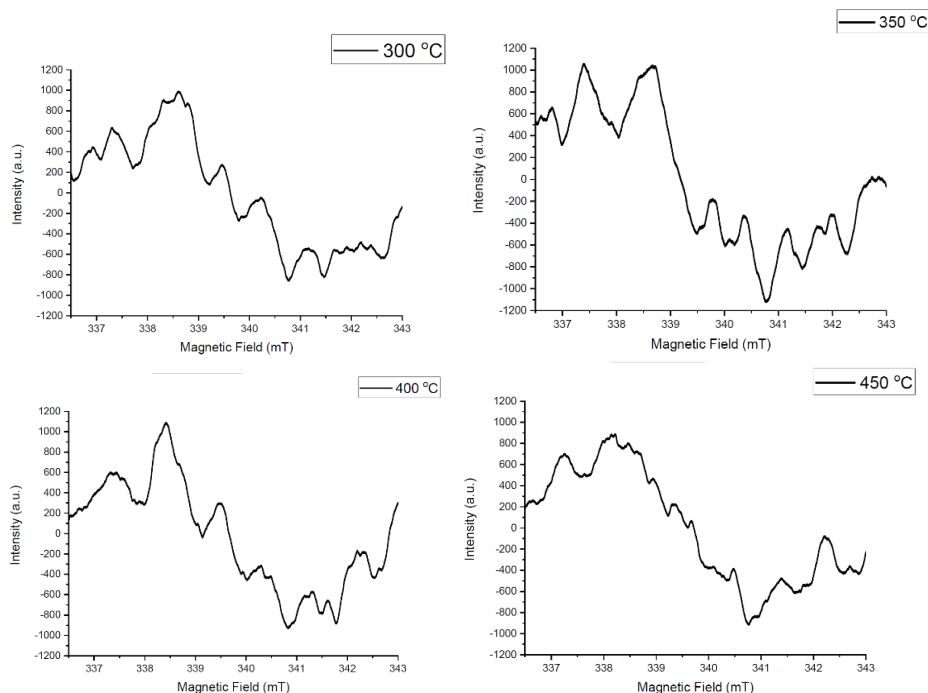


Рис. 3. Спектры ЭПР для образца с 25 слоями ZnO после отжига, при мощности СВЧ - 8 мВт: а – 300 °С, б- 350 °С, 400 °С, 450 °С

Исходя из различия в механизмах насыщения дуплетных сигналов и сигнала в центре развертки поля, формирование ZnO происходило на различных уровнях пористой иерархии.

ПМЦ участвуют при перемещении зарядов по полупроводнику через механизм прыжковой проводимости. При этом наибольшая концентрация частиц с оборванными связями находится на границах структур (макро и микро пор, а также нанокластеров). Поэтому, чем больше концентрация структур, тем выше скорость перемещения заряженных частиц.

### **Заключение**

Таким образом в результате порообразования кремния и последующего нанесения тонких слоев ZnO была сформирована трехуровневая иерархическая структура поверхности. Анализ фрактальных свойств показал наличие инвариантности структур поверхности относительно изменения масштаба на каждом из уровней. ЭПР исследования выявили наличие сверхтонкой структуры в спектре исходного образца. Показано, что интенсивность ЭПР сигнала, от захваченного на ПМЦ заряда, значительно растет после отжига при 400 °С при мощности СВЧ - 8 мВт.

### **Список литературы**

1. Gagarina, A. Y., Kuznetsov, A., Spivak, Y. M., Bolshakov, A. D., & Moshnikov, V. A. (2023, November). Influence of Laser Radiation Power on Raman Spectra of Nanostructured Silicon Wires with Crystallographic Orientation (111). In 2023 Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP) (pp. 40-42). IEEE.
2. Danatbek Murzalinov, Tatyana Seredavina, Ainagul Kemelbekova, Yulia Spivak, Vyacheslav Moshnikov, Daniya Mukhamedshina, Kostantin Mit', Nurzhan Ussipov, Elena Dmitriyeva, Sultan Zhantuarov, Sayara Ibraimova, Kazybek Aimagambetov, Ekaterina Bondar, Anastasiya Fedosimova (2023). Investigation of Surface Nanoclusters and Paramagnetic Centers of ZnO/Por-Si Structures as the Basis of Sensory Properties. Processes, 11(12), 3332.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КФЭУ С РАЗЛИЧНЫМИ СТРУКТУРАМИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

НАРТОВ А.Р.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Исследование посвящено анализу ключевых параметров нового фотодиода MAPD-3NM-II и MPPC S12572-010P. Исследование включает в себя изучение таких параметров как вольт-амперная характеристика, напряжение пробоя, коэффициент усиления и температурная зависимость напряжения пробоя. Полученные результаты демонстрируют превосходную производительность обеих структур, что говорит об их многообещающем применении в различных областях, включая космические технологии, медицину, физику высоких энергий, астрофизику и системы безопасности.

*Ключевые слова:* кремниевый фотоумножитель, SiPM, MAPD, MPPC, фотодиод, напряжение пробоя, температурный коэффициент

## Введение

Долгое время основными приборами для детектирования света в различных научных экспериментах являлись фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Однако с развитием полупроводниковой техники и технологии появилась возможность создания их твердотельных аналогов. На настоящий момент пиком развития полупроводниковых фотоприёмников являются кремниевые фотоумножители (КФЭУ, SiPM – silicon photomultiplier).

Начиная с 90-х годов, КФЭУ стали основными фотоприёмниками, которые используются в сцинтилляционных детекторах. Это привело к тому, что во многих экспериментах ФЭУ были вытеснены частично или полностью [1,2]. В частности, сейчас КФЭУ находят широкое применение в экспериментах в области физики высоких энергий, таких как БАК, NICA, ЦЕРН и других экспериментах [3,4,5].

Существует три различных типа структуры КФЭУ, и в этой работе мы использовали две из них: фотодиоды с глубинными и поверхностными пикселями [6]. Первым образцом является MAPD-3NM-II с глубоко расположенной пиксельной структурой от Zecotek Photonics. Его светочувствительная область составляет  $3,7 \times 3,7$  мм<sup>2</sup>, ширина пикселя 15 мкм, общее количество пикселей – 61605. [7,8,9] Второй образец, MPPC S12572-010P с поверхностной пиксельной структурой от Hamamatsu Photonics. Его светочувствительная площадь составляет  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, ширина пикселя – 10 мкм, общее количество пикселей – 90000. [10,11,12]

## Результаты измерений

На первом этапе проводилось измерение напряжения пробоя при комнатной температуре тремя способами: методом дифференцирования темновых вольт-амперных характеристик, методом Миллера и с использованием однофотоэлектронного спектра.

В первую очередь снималась темновая ВАХ. Для этого фотодиоды помещались в специальный тёмный бокс с дополнительным светоизоляционным материалом. Полученные ВАХ в логарифмическом масштабе приведены на рисунке 1.

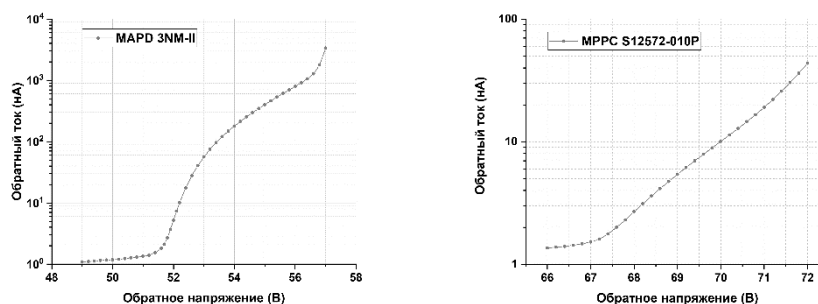


Рис. 1. ВАХ измеренных фотодиодов при  $T=23^\circ\text{C}$ : MAPD-3NM-II слева и MPPC S12572-010P справа

Используя ВАХ были определены рабочие напряжения и напряжения пробоя для исследуемых КФЭУ. Для этого строилась зависимость отношения  $(1/I(U)) \cdot (dI(U)/dU)$  от напряжения (рис. 2). Напряжение пробоя определяется как значение, при котором указанная зависимость имеет максимум [13].

При комнатной температуре, с использованием методов дифференцирования, напряжение пробоя было определено как  $52,20 \pm 0,027$  В для MAPD-3NM-II и  $68,14 \pm 0,043$  В для MPPC S12572-010P. Допустимый диапазон рабочих напряжений для MAPD-3NM-II был определен в диапазоне от 55 до 56,5 В, в то время как у MPPC S12572-010P эффективная работа будет наблюдаться в диапазоне от 70 до 72 В.

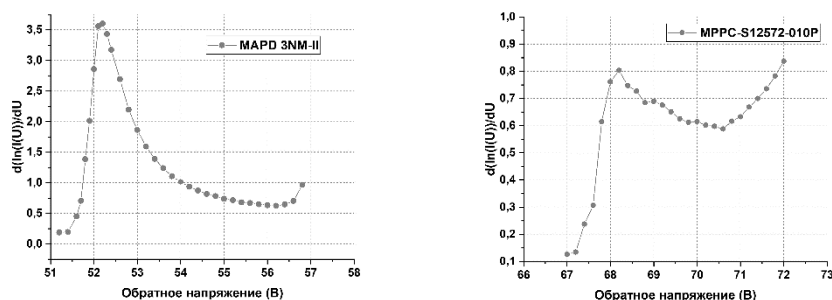


Рис. 2. Определение напряжения пробоя из их VAX при  $T=23^\circ\text{C}$  методом дифференцирования: MAPD-3NM-II слева и MPPC S12572-010P справа

В качестве второго метода измерения напряжения пробоя был использован метод Миллера. Суть метода заключается в измерении светового тока и определении напряжения пробоя путем аппроксимации зависимости величины, обратной величине светового тока, от обратного напряжения. Рабочая формула определения напряжения пробоя  $U_{br}$  при этом имеет вид  $1/J_t = k/J_{sv} + (k/U_{br} J_{sv}) \cdot U$ . Здесь  $J_t$  - суммарный ток,  $J_{sv}$  - фототок,  $k$  - эмпирический параметр. Световой ток определялся как разница между суммарным и темновым токами. Для каждого из образцов были построены графики зависимости обратного фототока от приложенного напряжения (рис. 3) [14]. Точка пересечения аппроксимационной прямой с осью абсцисс, и принималась за напряжение пробоя.

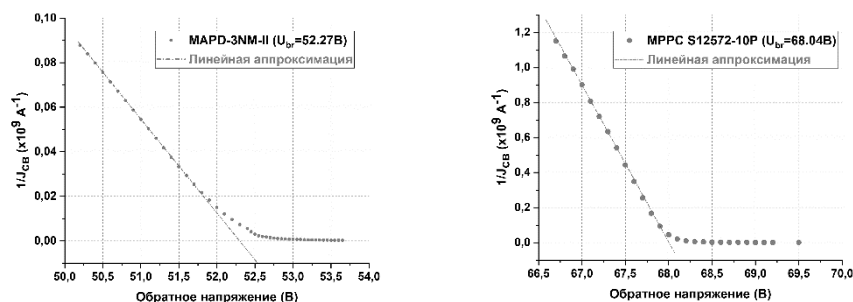


Рис. 3. Зависимость обратного значения фототока от обратного напряжения при  $T=23^\circ\text{C}$ : MAPD-3NM-II слева и MPPC S12572-010P справа

Напряжения пробоя, определённое этим методом, для MAPD и MPPC составили  $52,25 \pm 0,018$  В и  $68,09 \pm 0,13$  В соответственно.

Третий метод, используемый для определения напряжения пробоя КФЭУ, заключается в измерении зависимости усиления отдельных пикселей от перенапряжения. Сигнал с выхода усилителя (коэффициент усиления 100) поступал на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и оцифрованный результат – на компьютер.

Внутреннее усиление ( $M$ ) определялось путем вычисления среднего расстояния между двумя пиками однофотозлектронных спектров образцов по формуле



$M = mC_{\text{пикс}} (U_{\text{пр}} - U_{\text{бр}}) / q = A_{\text{ав}} \cdot 40 \text{ фК} / qK_{\text{ам}}$ , где  $C_{\text{пикс}}$  – емкость пикселя,  $U_{\text{пр}}$  – приложенное напряжение,  $U_{\text{бр}}$  – напряжение пробоя,  $m$  – коэффициент, изменяющийся от 1 до 2 в зависимости от значений сопротивления обеднённого слоя и емкости пикселя,  $K_{\text{ам}}$  – коэффициент усиления усилителя,  $q$  – заряд электрона,  $A_{\text{ав}}$  – это номер канала АЦП, соответствующий амплитуде одного фотоэлектрона, заряд каждого канала АЦП равен 40 фК [15].

Для обоих образцов зависимость внутреннего коэффициента усиления от напряжения представлена на рисунке 4. По мере увеличения напряжения усиление пропорционально возрастает, и пересечение аппроксимации экспериментально полученных точек с уровнем, где усиление приблизительно равно нулю, принимается за напряжение пробоя. Линейная аппроксимация позволила определить напряжение пробоя [15].

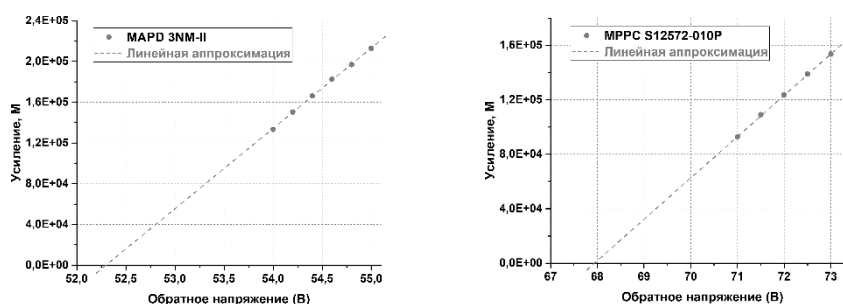


Рис. 4. Зависимость внутреннего усиления от обратного напряжения при  $T=23^{\circ}\text{C}$ : MAPD-3NM-II (слева) и MPPC S12572-010P (справа)

Значения, полученные с помощью усиления, очень близки к приведённым ранее:  $52,3 \pm 0,06$  В для MAPD-3NM-II и  $67,98 \pm 0,074$  В для MPPC S12572-010P.

Чтобы определить температурный коэффициент напряжения пробоя КФЭУ и исследовать характер его температурной зависимости, измеряются вольт-амперные характеристики в диапазоне температур ( $27^{\circ}\text{C} \div 47^{\circ}\text{C}$ ) с шагом  $5^{\circ}\text{C}$  [12].

Зависимость напряжения пробоя от температуры аппроксимируется линейной функцией вида  $U_{\text{бр}}(T) = k \cdot T + U_{\text{бр}0}$ , где  $k$  – искомый температурный коэффициент напряжения пробоя. Графики зависимости напряжения пробоя от температуры с аппроксимацией приведены на рисунке 5. Результаты аппроксимации:  $U_{\text{бр}}(T) = 0,0515 \cdot T + 50,803$ ; для MAPD-3NM-2LOT и  $U_{\text{бр}}(T) = 0,057 \cdot T + 66,611$ . для MPPC S12572-010P.

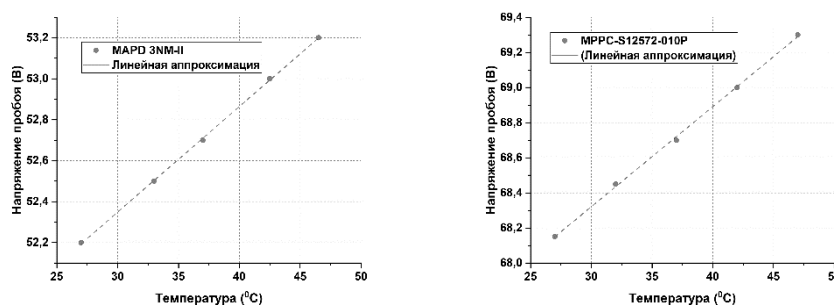


Рис. 5. Определение температурного коэффициента напряжения пробоя в температурном интервале

[27°C, 47°C] для MAPD 3NM-II (слева) и MPPC S12572-010P (справа)

Рассчитанные температурные коэффициенты напряжения пробоя составили 57 мВ/°С для MPPC S12572-010P и 51,5 мВ/°С для MAPD-3NM-II.

### Заключение

Были исследованы напряжение пробоя, температурная зависимость напряжения пробоя и внутренний коэффициент усиления двух фотоумножителей: MAPD-3NM-II и MPPC-S12572-010P. Для расчета напряжения пробоя были использованы три различных метода. Было определено, что при 23°C среднее напряжение пробоя составляет 52,26 В для MAPD-3NM-II и 68,04 В для MPPC-S12572-010P. Было обнаружено, что температурный коэффициент напряжения пробоя в диапазоне 27-47 °С составляет 51,5 мВ/°С для MAPD-3NM-II и 57 мВ/°С для MPPC-S12572-010P. Внутренний коэффициент усиления равен  $2 \cdot 10^5$  и  $1,4 \cdot 10^5$  для MAPD-3NM-II и MPPC-S12572-010P при их оптимальных напряжениях соответственно. Улучшенные параметры исследованных КФЭУ, по сравнению с предыдущими версиями, делают их более подходящими для применения в различных исследованиях. Полученные данные имеют значение для экспериментов, в которых детектор планируется использовать в условиях колебаний или нестабильной температуры.

### Список литературы

1. Kovaltchouk V.D., Lolos G.J., Papandreou Z., Wolbaum K. Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. 2005. 538. P. 408–415.
2. Ponento A., Martoff C.J., Jones D., Kaczanowicz E. The Silicon Photomultiplier as a modern solid-state replacement of the vacuum photomultiplier tube // Journal of Instrumentation. 2019. №14. P. T08003.
3. Kushpil V., Mikhaylov V., Kugler A., et.al. Radiation hardness of semiconductor avalanche detectors for calorimeters in future HEP experiments // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 675. P. 012039.
4. Mikhaylov V., Guber F., A. Ivashkin A., et.al. Characterisation of SiPM radiation hardness for application in hadron calorimeters at FAIR, CERN and NICA // Journal of Instrumentation. 2020. Vol. 15. P. C02005.
5. Yurevich V. I., Sedykh S. A., Sergeev S. V., et.al. Development of scintillation detectors with SiPM readout for the NICA project // International Journal of Modern Physics: Conference Series. 2020. Vol. 50. P. 2060008.
6. Sadygov Z., Olshevski A., Chirikov I., et.al. Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2006. vol. 567. P.70-73.
7. Ahmadov F., Ahmadov G., Akbarov R. et.al. Investigation of parameters of new MAPD-3NM silicon photomultipliers // Journal of Instrumentation. 2022. Volume 17. P. C01001.
8. Holik M., Ahmadov F., Sadygov A. et al. Investigation of the possibility of a new detector based on SiPM in nuclear forensics // Journal of Instrumentation. 2023. Volume 18, P. C01015.
9. Zecotek Photonics Inc.: сайт. – URL: <https://zecotek.com>.
10. Hamamatsu Photonics: сайт. – URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en.html>.
11. Akbarov R., Nuriyev S., Ahmadov F., et.al. Scintillation Light Detection with MAPD-3NK and MPPC-S12572-010P Readout // KnE Energy & Physics. 2018. vol. 3(1). P. 357 – 362.
12. PT100 platinum resistance thermometers. Pico Technology: сайт. – URL: <https://www.picotech.com/library/application-note/pt100-platinum-resistance-thermometers>.
13. Nagy F., Hegyesi G., Kalinka G., Molnár J. A model based DC analysis of SiPM breakdown voltages // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. 2017. Volume 849. P. 55-59.
14. Sadygov Z., Abdullaev Kh., Akhmedov G., et.al. On possibilities of application of Miller formula for determination of parameters of Micropixel Avalanche Photodiodes – Текст: электронный // arXiv: интернет портал. – URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1404.2108>
15. Ahmadov F., Abdullayev F., Ahmadov G., et.al. A new physical model of Geiger-mode avalanche photodiodes // Journal of Instrumentation. 2020. Volume 15, P. C01019.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТОБОРАБОТКИ ЛИПОСОМ

НИКИФОРОВ А.И.<sup>1,2</sup>, АНУФРИЕВ И.Е.<sup>1,2</sup>, МАЛЬКОВ Д.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

<sup>2</sup>ФГБУ «НМИЦ им В.А. Алмазова» Минздрава России

**Аннотация.** В данной работе проводилось сравнение наиболее популярных методов постформовой обработки липосом, а именно соникации и экструзии. В ходе работы был разработан собственный аналог липосомального экструдера. Для оценки его работы проводится сравнение с зарубежным прибором. Помимо этого, оценивается вклад гомогенизирующих мембран на результат экструзии.

*Ключевые слова:* Липосомы, соникация, экструзия, гомогенизирующие фильтры, пористый анодный оксид алюминия, ПАОА, полиэфирсульфон, поликарбонат.

За последние несколько десятилетий было разработано множество методов синтеза липосом [1]. Однако практически все методы имеют весомые недостатки: полученные таким образом липосомы получаются в основном многослойными и имеют большой разброс по размерам. Для обеспечения высокой полидисперсности образца используются различные методы постобработки. На данный момент самые актуальные и простые методы – ультразвуковая обработка (соникация) и экструзия под высоким давлением. Ультразвуковая обработка липосом заключается в воздействии на суспензию звуковыми волнами высокой частоты. В результате воздействия липидная мембрана липосом разрывается, что способствует уменьшению среднего размера. Для ультразвуковой обработки как правило используют либо ультразвуковой диспергатор, либо ультразвуковую ванну. Метод экструзии подразумевает обработку готовых липосом, размеры которых, отличаются от необходимых. Сам метод заключается в пропускании липосомального раствора под давлением через мембранный фильтр, размеры пор которого равны конечному размеру липосом. Как правило, для достижения получения однородного раствора везикул, необходимо пропустить липосомы через экструдер несколько раз (около 5-7). В процессе экструзии образуются однослойные везикулы с вытянутой цилиндрической формой [2]. Это связано с силами сдвига, вызванными давлением во время гомогенизации. В последствии везикулы релаксируют до сферического размера. По своей сути, при экструзии осуществляется ультрафильтрация раствора, так как он прогоняется под давлением через макропористую мембрану, под давлениями 0.1-МП. За счет этого повышается качество полученного продукта, так как происходит фильтрация раствора от ненужных механических частиц, избавление от лекарственного вещества, не попавшего в липосомы и его стерилизация.

Целью работы являлось сравнение двух методов постобработки липосом: ультразвукового и экструзионного. Кроме того, было проведено сравнение двух разных экструдеров: Liposofast LF-50 и экструдера собственного производства. Также было проведено сравнение трёх мембран из различных материалов.

Нами был разработан собственный аналог автоматического экструдера (рис 1).



*Рис. 1. Разработанный липосомальный экструдер*

В отличие от своих аналогов, его конструкция отличается упрощенной системой сборки и фиксации мембраны, более легким весом и возможностью его крепления на штативе [3].

Самой главной частью экструдера, благодаря которой возможны перечисленные ранее преимущества методики, является мембрана. Мембраны, используемые в экструзии, как правило, изготавливаются из поликарбоната, полиэфирсульфона и нейлона [4], реже из других материалов. Поры в них обладают цилиндрической формой, и многослойные везикулы, проходя через них, распадаются на частицы меньшего размера. В данной работе исследуется влияние гомогенизирующих фильтров и их характеристик на процесс экструзии, для этого было взято несколько видов мембран: поликарбонатные (ПК), полиэфирсульфонные (ПЭС) и из пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) [5].

Для определения различий в морфологии мембраны были рассмотрены под растровым электронным микроскопом растровый электронный микроскоп Quanta Inspect FEI с двух сторон. Затем, полученные изображения анализировались с помощью программы Image J для определения поверхностной пористости и распределения диаметра пор по размерам. После анализа структуры мембран, можно сказать, что наиболее однородными являются мембраны на основе ПК, а наименее однородными ПЭС. Все мембраны имеют заявленный диаметр пор 200 нм, однако на деле только ПАОА близок к этому значению. Так же, можно заметить, наибольшей пористостью обладают мембраны ПАОА, наименьшей – поликарбонатные. Все эти параметры могут влиять на конечный результат экструзии.

Разработанный экструдер сравнивался с экструдером LF-50 компании Avestin. В качестве еще одного метода постформовой обработки выбран метод соникации как самый простой и популярный. В нем использовался диспергатор УЗГ13-0,1/22, Россия. В качестве образца для постобработки методом гидратации тонкой плёнки были синтезированы липосомы с инкапсулированным индоцианином зелёным. Оценка физико-химических характеристик получаемых частиц, таких как гидродинамический диаметр, индекс полидисперсности и дзета-потенциал проводилась с помощью Zetasizer Ultra компании Malvern.

Полученный раствор делили на 3 части, первая часть подвергалась воздействию ультразвука на частоте 20 кГц на протяжении 15 минут, вторая и третья пропусклась через разработанный экструдер и LF-50 5 раз под давлением 6 атмосфер. Было проведено несколько аналогичных опытов, отличавшихся мембранами, используемыми в экструдерах.

Для оценки эффективности методов сравнивались индексы полидисперсности растворов и зависимости процентного соотношения липосом от их размера. Липосомы, полученные методом гидратации тонкой пленки, имели широкое распределение частиц по размеру от сотен нанометров до единиц микрон и индексом полидисперсности больше 0.4, что говорит о большой разнице в размерах полученных липосом. Метод соникации, как и экструзии, уменьшили размер общий размер частиц, а значение индекса полидисперсности стало меньше 0.4. Сравнение метода соникации и экструзии показало способность обоих методов уменьшать даже большие мультиламеллярные везикулы. В большинстве случаев экструзия дает более гомогенный раствор липосом меньшего размера, при этом размер полученных липосом более точно контролируется используемой мембраной. Так же в пользу метода экструзии говорит меньший шанс разрушить липосомы в процессе обработки и дополнительная фильтрация и стерилизация конечного продукта. Скорость процесса в случае экструзии может отличаться в зависимости от прикладываемого давления. В целом, ультразвуковая обработка несколько менее затратна по времени. В конечном счете, при выборе методики обработки липосом, стоит выбирать именно экструзию, так как средний гидродинамический размер получается, как правило, меньшим, чем при ультразвуке, а гомогенность раствора несравнимо выше. Но, так как экструзия требует специального оборудования, метод соникации более доступен.

При сравнении экструдеров видно, что разработанный нами прибор не уступает в эффективности, при этом обладает более простой и удобной для пользователя конструкцией.

На основе полученных данных можно сделать вывод о влиянии мембраны, используемой для гомогенизации в экструзии. Наилучший результат в отношении гомогенности раствора дает поликарбонатная мембрана, но отличие с остальными мембранами незначительное. Липосомы, гомогенизированные с помощью ПЭС мембраны, дают худший результат из представленных фильтров. Основываясь на данных, полученных с помощью РЭМ, становится ясно, что это связано с большим разбросом размера пор для ПЭС. Несмотря на средний размер пор около 400 нм, конечный размер везикул оказался меньше, что может говорить о более тонких каналах внутри фильтра. При этом, сетчатая система пор ПЭС проигрывает сквозным порам как в ПК, так и в ПАОА, так как такой фильтр может быстро засориться. ПАОА показал средние характеристики среди представленных фильтров, но стоит заметить, данный результат сохраняется при использовании одной мембраны при нескольких использованиях. Для многократного использования достаточно промыть мембрану в спирте и полярном растворителе, например, хлороформе. Это удалит липиды и инкапсулированное вещество с поверхности фильтра. В конечном счете все мембраны подходят для гомогенизации и показали удовлетворительный результат, и размер полученных частиц ходе гомогенизации зависит больше от исходной конфигурации липосомального раствора, чем от характеристик мембраны.

### **Список литературы**

1. Li, Z. Effect of dynamic high pressure microfluidization on structure and stability of pluronic F127 modified liposomes [Text] / Z. Li, S. Peng, X. Chen, et.al. // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2019. – V. 40, N. 7. – P. 982-989.
2. Mui, B. L., Cullis, P. R., Evans, E. A., Madden T. D. Osmotic properties of large unilamellar vesicles prepared by extrusion // Biophys. J. — 1993. — Vol. 64. — № 2. — Pp. 443–453.
3. Ануфриев, И.Е. Разработка ручного экструдера для гомогенизации липосом / И.Е. Ануфриев, Е.Н. Муратова, Д.В. Королев, Г.А. Шульмейстер, Р.Г. Валеев, В.А. Мошников // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. — 2022. — Вып. 14. — С. 8-16. DOI: 10.26456/pcascnp/2022.14.008.
4. Дмитриева, М. В. Метод экструзии в технологии получения липосом / М. В. Дмитриева [и др.] // Вестник ВГУ. — Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2020. — № 3. — С. 87–96.
5. Ануфриев И. Е., Муратова Е. Н., Валеев Р. Г., Королев Д. В., Кондратьев В. М., Мошников В. А. Нанопористые мембраны на основе оксида алюминия для гомогенизации липосомального раствора // Вестник НовГУ. 2023. №1 (130).

## НЕРЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Новиков И.А.<sup>1,2</sup>, Бобков А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,

<sup>2</sup>ООО «НТ-МДТ»

**Аннотация.** Атомно-силовой микроскоп (АСМ) с самого своего появления стал важнейшим научно-исследовательским инструментом в физике поверхности. Большая востребованность инструмента объясняется широким спектром АСМ методик исследования разнообразных локальных свойств поверхности образца с нанометровым пространственным разрешением. Исходя из этого, цель настоящей работы – ознакомление с методикой, позволяющей оценивать такие механические свойства поверхности, как модуль Юнга, жесткость, адгезия.

*Ключевые слова:* АСМ, СЗМ, прыжковая микроскопия, золь-гель

### Введение

Появление такого семейства измерительных устройств как сканирующие зондовые микроскопы было вызвано необходимостью проводить анализ микро- и нанорельефа различных структур. Первоначально измерению могли подвергаться лишь проводящие электрический ток материалы в рамках сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), однако последующее изобретение атомно-силового микроскопа (АСМ) [1] позволило снять ограничение на проводящие свойства образцов, что открыло новые горизонты в возможностях характеристики сканируемых объектов.

Классические методики измерения в АСМ делятся на две группы: статические и динамические [2, 3]. В первом случае анализ материалов проводится отслеживанием отклонения упругой консоли зондового датчика (кантилевера) от своего начального положения, а во втором – по изменению амплитуды и фазы вынужденных колебаний зонда в результате взаимодействия с образцом. Возбуждение колебаний в динамических режимах осуществляется на собственных частотах кантилевера, которые составляют сотни кГц и зависят от конструкции зонда.

Помимо традиционных методов исследования, заключающихся в картографировании поверхности образца, возможно проводить и локальные измерения

механических свойств объекта [4, 5]. Такие измерения базируются на контроле так называемых «кривых подвода-отвода» – снятие зависимости изгиба упругой консоли от расстояния над образцом  $z$ . На относительно небольшом расстоянии от поверхности зонд начинает испытывать на себе действие сил притяжения атомов образца, из-за чего происходит скачок к поверхности. В силу наличия капиллярного взаимодействия, обусловленного присутствием тонкого ( $\sim 2$  нм) слоя адсорбированной жидкости, вид кривой отвода может отличаться от кривой подвода, образуя тем самым гистерезис.

Изучаемые силовые кривые всегда довольно специфичны и отличаются в зависимости от конкретного образца, однако довольно часто можно выделить общие для каждой структуры участки на этой зависимости. Ее обобщенный вид представлен на рис. 1.

- Участок 1-2. Изначально зонд находится на относительно большом расстоянии от поверхности изучаемого материала, кантилевер остается в своем первоначальном положении, не изогнут. Продолжается это до точки 2, в которой на зонд начинают действовать силы Ван-дер-Ваальса, притягивающие его к поверхности.

- Участок 2-3. Данный участок называют «jump-to-contact», так как на нем кантилевер резко отклоняется от исходного положения по направлению к поверхности. В точке 3 происходит непосредственный контакт иглы зондового датчика с поверхностью.

- Участок 3-4. Происходит дальнейшее прижатие зонда к образцу, зависимость изгиба кантилевера становится прямо пропорциональной силе прижатия. В том случае, если жесткость кантилевера выше, чем у образца, на данном участке возможно проводить исследования упругих свойств структуры по наклону кривой. Данный участок может не являться строго прямой линией. Отклонения от линейности могут свидетельствовать, например, о том, что под воздействием внешней силы, оказываемой зондом на поверхность, структура претерпевает неупругие деформации, а также об изменении состава образца по мере углубления.

- Участок 4-5. В точке 4 подвод зонда к поверхности прекращается, и начинается стадия отвода. В некоторый момент времени зонд продолжает удерживаться Ван-дер-Ваальсовыми, а если измерения проводятся на воздухе, то и капиллярными силами. По изменению угла наклона кривых 3-4 и 4-5 можно судить о модуле Юнга, жесткости и деформации изучаемого образца.

- Участок 5-6. На данном участке сила упругости консоли преодолевает силы притяжения зонда к поверхности, поэтому происходит резкий скачок от образца, из-за чего данный участок носит название «jump-of-contact». Для исследования адгезионных свойств материала этот участок играет ключевую роль.

- Участок 6-7. На последнем участке взаимодействие зонда и образца прекращается, зондовый датчик возвращается в исходное положение.

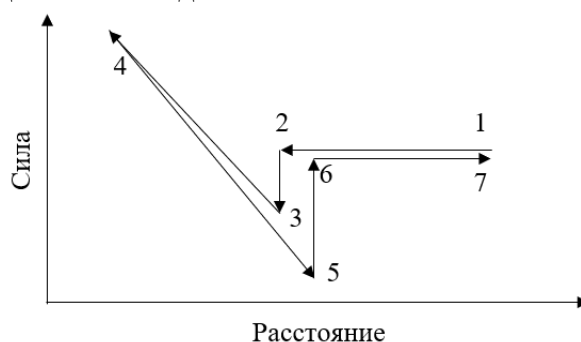


Рис. 1. Качественная зависимость силы прижатия зонда к поверхности образца от расстояния над образцом

Проведение таких исследований требует прецизионного контроля за поведением зондового датчика с частотой отслеживания порядка тысячи Гц. Поэтому до настоящего времени вышеописанная методика применялась лишь в качестве точечного инструмента анализа свойств поверхности. Развитие электронной компонентной базы позволило увеличить общее быстродействие системы, в результате чего стало возможным скомбинировать методы картографирования поверхности с анализом механических, физико-химических и электрических свойств в рамках сканирующей прыжковой микроскопии (СПМ).

Как было сказано ранее, сущность СПМ заключается в последовательном измерении зависимости силы прижатия зонда к поверхности образца от величины расстояния между зондом и образцом  $F(z)$  в каждой точке области сканирования. Таким образом, перемещаясь от пикселя к пикселю удается получить распределение по поверхности большого количества параметров структуры в рамках одного сканирования. Данная сканирующая мода считается более щадящей как по отношению к образцам, так и по отношению к зонду в силу отсутствия боковых сил взаимодействия, приводящих к закручиванию зонда и впоследствии к его поломке.

### Эксперимент

Рассмотрим возможности применения СПМ на примере исследования золь-гель-системы оксида цинка и диоксида кремния (рис. 2). Наноструктурированный оксид цинка и композиты на его основе – перспективный материал, который находит применение в разных устройствах (полупроводниковые приборы, гибкие экраны, светодиоды и т.д.) и разных сферах (солнечная энергетика, фотокатализ, сенсорика, медицина) [6-11].

АСМ-исследования проводились с использованием сканирующего зондового микроскопа NTEGRA Prima производства ООО «НТ-МДТ».

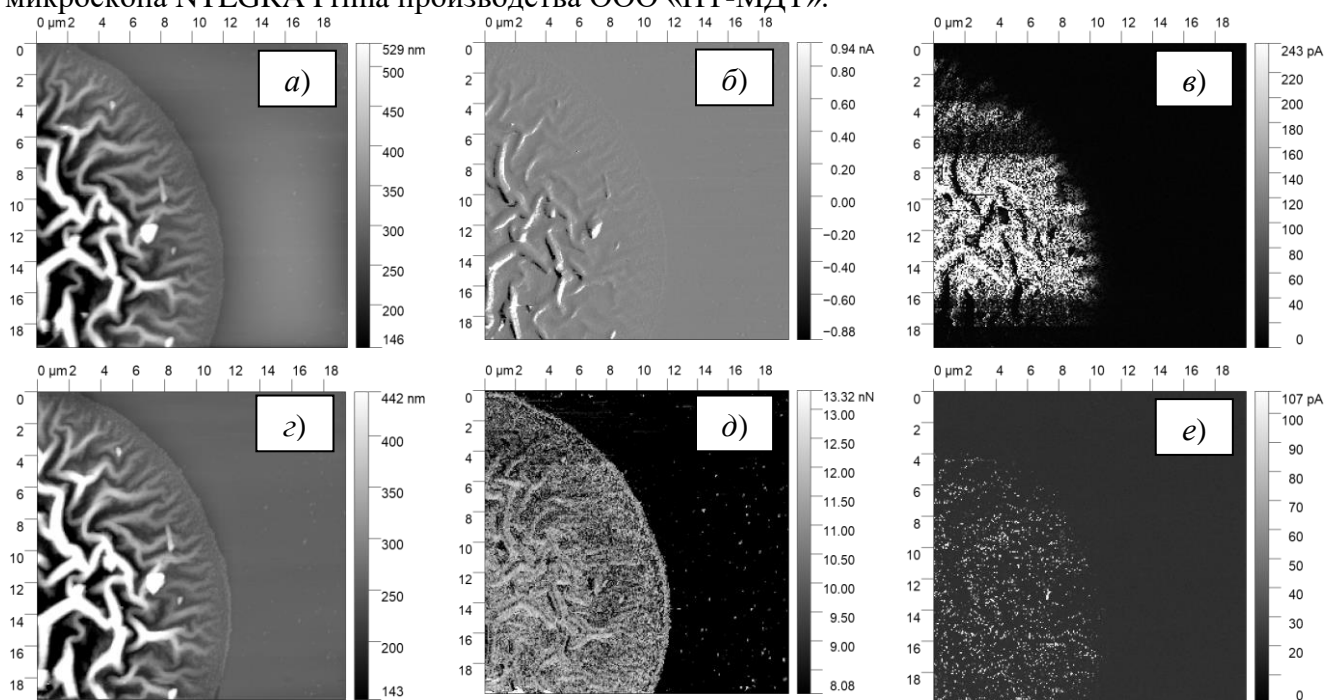


Рис. 2. АСМ-изображения золь-гель системы  $ZnO-SiO_2$  на  $Si$ -подложке, полученные в контактном (а-в) и СПМ (г-е) режимах



На рис. 2 показаны результаты сканирования одного и того же участка сначала в контактном режиме с применением методики измерения сопротивления растекания, а затем в режиме СПМ, также измеряя протекающий электрический ток между зондом и образцом. Как можно заметить, СПМ не уступает классическим методикам измерения по части качества получаемого изображения топографии поверхности, что видно из сравнения изображений рис. 2, а) и рис. 2, з). Изображение на рис. 2, б) представляет собой среднеарифметическое значение сил бокового закручивания кантилевера (сигнал LF) в прямом и обратном проходах, что таким образом отображает карту распределения сил трения по поверхности. Однако стоит заметить, что величина контраста на изображении недостаточно велика, чтобы с полной уверенностью говорить о различии фазового состава образца. Карта распределения токов на рис. 2, в) при этом довольно четко демонстрирует различия в электропроводящих свойствах подложки и нанесенной на нее золь-гель-системы. Силы адгезии на рис. 2, д) демонстрируют различия в величине сцепления между зондом и образцом в процессе сканирования, благодаря чему становится возможным качественно отличать лиофильные и лиофобные участки поверхности [12]. Токовая карта (рис. 2, е)), полученная в режиме СПМ, более точно измеряет каналы проводимости за счет отсутствия бокового закручивания кантилевера в процессе сканирования, что присуще традиционным методикам исследования сопротивления растекания, из-за чего уменьшается площадь контакта между зондом и поверхностью образца. В свою очередь это может привести к уменьшению наблюдаемого сигнала по току. Увеличение силы прижатия кантилевера к поверхности может помочь повысить площадь контакта за счет продавливания острия вглубь образца, однако это может привести к пластическим деформациям исследуемого материала.

### **Заключение**

В данной работе были показаны новые возможности для разностороннего исследования наноструктурированных материалов в рамках сканирующей зондовой микроскопии. Прыжковая микроскопия требует от операторов большего внимания и подготовки для правильного задания параметров сканирования, а также интерпретации полученных результатов, нежели базовые методы АСМ. Однако комбинации представленного метода с уже имеющимися режимами работы атомно-силовых микроскопов, несомненно, позволят качественно новым образом проводить микро- и наноскопию свойств материалов [13, 14].

### **Список литературы**

1. Binnig G., Quate C. F., Gerber C. Atomic force microscope // *Physical review letters*. – 1986. – Т. 56. – № 9. – С. 930.
2. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие / В.А. Мошников, Ю.М. Спивак, П.А. Алексеев, Н.В. Пермяков. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 144 с.
3. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: РАН Институт физики микроструктур, 2004. – 260 с.
4. Чижик С.А., Сыроежкин С.В. Методы сканирующей зондовой микроскопии в микро- и наномеханике // *Приборы и методы измерений*. – 2010. – № 1 (1). – С. 85–94.
5. Морозов И.А., Ужегова Н.И. Определение механических свойств материалов на основе моделей взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с поверхностью образцов // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2014. – Т. 7. – № 4. – С. 385–397.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

6. Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. 2-е издание. – СПб.: Изд-во «Элмор», 2008. – 225 с.
7. Золь-гель технология микро- и нанокompозитов. Учебное пособие / Мошников В.А., Таиров Ю.М., Хамова Т.В., Шилова О.А. – СПб: «Лань», 2013.
8. Грачева И.Е., Мошников В.А. Наноматериалы с иерархической структурой пор: учеб. пособие. –СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
9. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры / Бобков А. А., Кононова И. Е., Мошников В. А. // под ред. В. А. Мошникова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 204 с.
10. Способ изготовления газового сенсора с наноструктурой со сверхразвитой поверхностью и газовый сенсор на его основе / Аверин И.А., Бобков А.А., Карманов А.А., Мошников В.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д. // патент на изобретение RUS 2687869 09.010.2018
11. Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике / О. А. Александрова, А. А. Бобков, А. И. Максимов, Е. В. Мараева, Л. Б. Матюшкин, В. А. Мошников, . Н. Муратова, С. С. Налимова, А. А. Рябко, Ю. М. Спивак. // под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 266 с.
12. Новиков И.А. Исследование особенностей гидрофобно-гидрофильных свойств антиобледенительных покрытий методами АСМ // Наука настоящего и будущего. – 2022. – Т. 1. – С. 108-111.
13. Новиков И.А., Тесленко Е.Г. Тенденции развития атомно-силовой микроскопии для применения в области нанотехнологий // Наука настоящего и будущего. – 2023. – Т. 1. – С. 240-243.
14. Самсыгин П.Ф. Исследование полимерных материалов в режиме гибридной моды атомно-силового микроскопа // Наука настоящего и будущего. – 2023. – Т. 1. – С. 212-215.

## ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ $\text{MAPbI}_3$ С ДОБАВЛЕНИЕМ МОНОЭТАНОЛАМИНА

ОВЕЗОВ М. К., РЯБКО А. А., АЛЕШИН А.Н.

*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*

**Аннотация.** В последние годы растет число исследований, посвященных использованию пленок металлорганических перовскитов в качестве активного слоя при изготовлении солнечных элементов, однако их применение ограничено значительной деградацией. В этой работе авторы исследуют влияние добавления моноэтанолamina в состав перовскита  $\text{MAPbI}_3$  на оптические свойства и вольт-амперные характеристики. Показано, что введение катиона моноэтанолamмония в кристаллическую решетку приводит к увеличению ширины запрещенной зоны, а также улучшению стабильности перовскитных пленок. Обнаружено, что перовскитные пленки  $\text{MA}_{0,5}\text{MEA}_{0,5}\text{PbI}_3$  обладают оптимальной шириной запрещенной зоны для применения в tandemных солнечных элементах на основе кремния.

*Ключевые слова:* металлорганические перовскиты, твердый раствор, оптическое поглощение, солнечные элементы.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-42-10029; <https://rscf.ru/en/project/23-42-10029/>.

### Введение

Растущее внимание привлекают солнечные элементы (СЭ) на основе металлоорганических перовскитов  $(\text{FA})(\text{MA})\text{MX}_3$ , где FA – формамидиний  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2$  или MA – метиламмоний  $\text{CH}_3\text{NH}_3$ , металл  $\text{M} = \text{Pb}$ , галоген  $\text{X} = \text{Br}$  или  $\text{I}$ , благодаря демонстрируемым значениям КПД, превышающих 25%, что ставит их в один ряд с СЭ на основе кремния [1]. Металлоорганические перовскиты используют также для создания фотодетекторов, детекторов рентгеновского излучения, мемристорах [2-5]. Основной проблемой применения перовскитных СЭ, однако, является их недолговечность из-за фотодегradации, вследствие чего многие исследования посвящены в первую очередь улучшению их стабильности. Основные стратегии улучшения стабильности перовскитных поликристаллических пленок включают использование полностью неорганические перовскитные соединений [6], молекулярную пассивацию [7,8], формирование пленок из 3D/2D перовскитов [9,10]. Для молекулярной пассивации или формирования 2D-слоистых перовскитов, как правило, используются амины [8].

В данной работе исследовалась частичная замена катионов метиламмония в металлоорганическом перовските  $\text{MAPbI}_3$  на катионы моноэтанолamмония, обладающей большей длиной молекулярной цепочки.

### Материалы и методы

Твердый раствор  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  получали путем смешивания раствора моноэтанолamмония йодида и  $\text{PbI}_2$  с раствором  $\text{MAPbI}_3$  в диметилформамиде в диапазоне доли катиона моноэтанолamмония от 0,25 до 0,75 и дальнейшей термической кристаллизацией. Тетрагональная перовскитная структура твердых растворов  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  была подтверждена рентгенофазовым анализом. Для приготовления образцов поликристаллические пленки  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  наносились методом центрифугирования из раствора диметилформамида и диметилсульфоксида (объемное соотношение 4:1) с массовой концентрацией  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  ~400 мг/мл с дальнейшим отжигом при температуре 110 °C в течение 10 мин. Скорость центрифугирования составляла 3000

об/мин (в течение 30 с) с предварительным центрифугированием на скорости 1000 об/мин (10 с). Для измерения спектров оптического поглощения (спектрофотометр ПЭ-5400УФ) образцы наносились на стеклянные подложки. Для измерения вольтамперных характеристик (пикоамперметр Keithley 6487) перовскитные пленки наносили на керамические подложки со встречно-штыревыми золотыми электродами (сенсорная платформа, “Tesla Blatna” АО Чехия). Толщина электродов и расстояние между ними составляло 25 мкм. Для регистрации фотоотклика образцы облучались зеленым светодиодом с пиковой длиной волны 535 нм, что приблизительно соответствует длине волны с максимальной интенсивностью в спектре солнечного излучения на поверхности Земли. Между измерениями образцы хранились в вакуумном эксикаторе.

### Результаты и их обсуждение

Из спектров оптического поглощения поликристаллических пленок  $MA_xMEA_{1-x}PbI_3$  (рис.1) видно, что увеличение доли катиона моноэтаноламмония в кристаллической решетке металлоорганического перовскита приводит к изменению формы спектров поглощения и смещению края поглощения в коротковолновую область с увеличением оптической ширины запрещенной зоны от  $E_g \approx 1,57$  эВ для  $MAPbI_3$  до  $E_g \approx 1,94$  эВ для  $MA_{0,25}MEA_{0,75}PbI_3$ . Оптическая ширина запрещенной зоны  $MA_{0,5}MEA_{0,5}PbI_3$  составляет  $E_g \approx 1,75$  эВ и является примерно оптимальным значением для применения перовскитной фотовольтаической структуры в tandemных СЭ на основе кремниевой фотовольтаики.

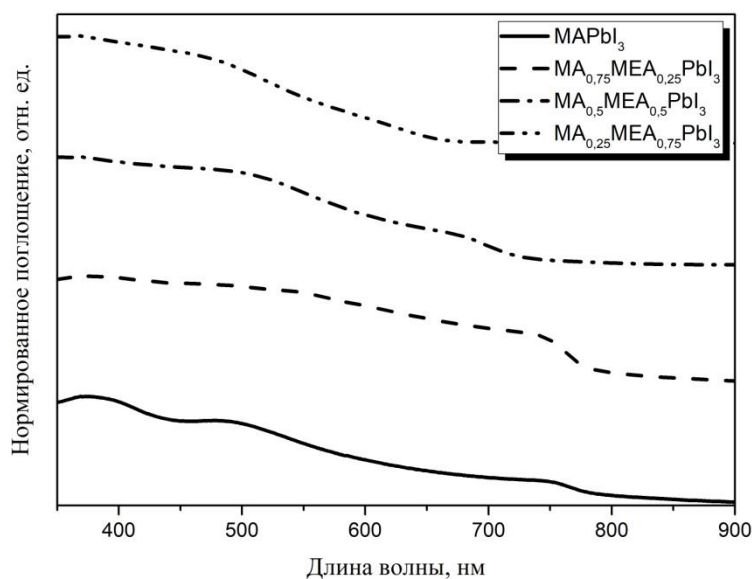


Рис. 1. Спектр оптического поглощения поликристаллических пленок  $MA_xMEA_{1-x}PbI_3$  с изменением долей катионов метиламмония и моноэтаноламмония

На рисунке 2 представлены типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) полученных образцов. Образец  $MAPbI_3$  демонстрирует наилучшую фоточувствительность к облучению с  $\lambda \approx 535$  нм с изменением тока через образец на 2 порядка, однако демонстрирует признаки деградации, выражающиеся в нелинейности ВАХ, вероятно, вызванной миграцией ионов йода  $I^-$ .

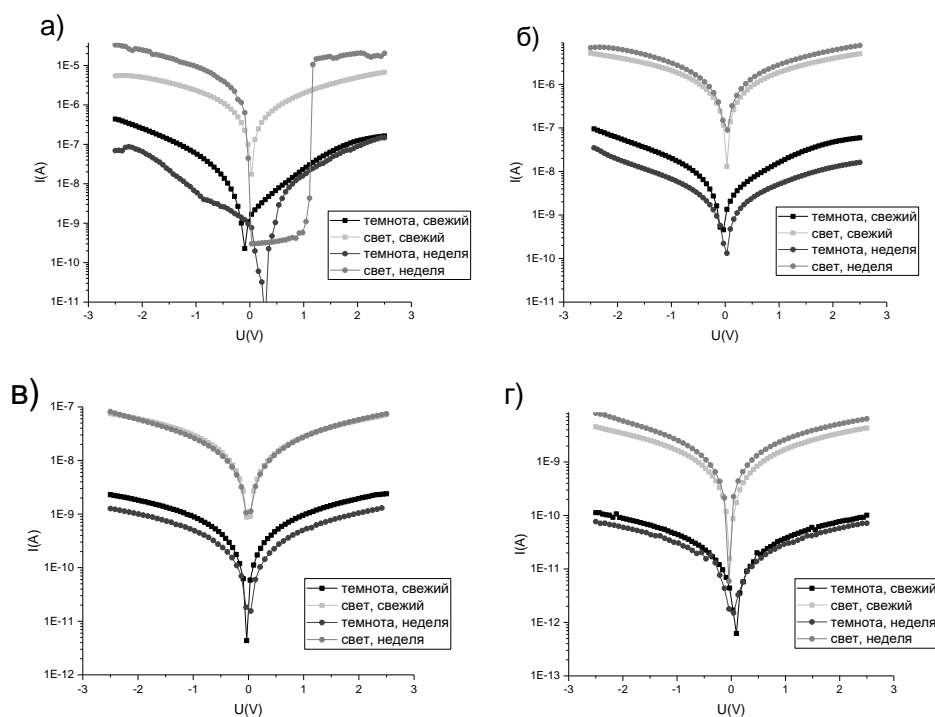


Рис. 2. Вольтамперные характеристики образцов, полученных с использованием а) чистого  $\text{MAPbI}_3$ , б) 25%  $\text{MEA}$ , в) 50%  $\text{MEA}$ , г) 75%  $\text{MEA}$

С увеличением доли моноэтаноламмония наблюдается уменьшение фотоотклика, что согласуется с изменением спектров поглощения образцов. Тем не менее, все образцы  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  демонстрируют фоточувствительность. При этом образцы с большей долей моноэтаноламмония демонстрируют лучшую воспроизводимость темновых ВАХ после хранения образцов, что указывает на меньшую деградацию поликристаллических пленок. Увеличение сопротивления пленок с увеличением доли моноэтаноламмония, вероятно, связано с увеличением ширины запрещенной зоны и энергией активации носителей заряда, а также уменьшения доли ионного транспорта в проводимости, что согласуется с улучшением стабильности образцов. На сопротивление образцов также оказывает значительное влияние морфология поликристаллических пленок (размеры и форма зерен), толщина пленок.

Таким образом, металлорганические перовскитные пленки  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  демонстрируют увеличение ширины запрещенной с увеличением доли катиона моноэтаноламмония. Также увеличение доли моноэтаноламмония в  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$  обеспечивает улучшение стабильности по сравнению с образцами  $\text{MAPbI}_3$ . Образцы поликристаллических пленок  $\text{MA}_x\text{MEA}_{1-x}\text{PbI}_3$ , полученные в данной работе, демонстрируют фоточувствительность к видимому облучению и могут быть использованы для фотовольтаических структур. Так перовскитные пленки  $\text{MA}_{0.5}\text{MEA}_{0.5}\text{PbI}_3$  с шириной запрещенной зоны  $E_g \approx 1.75$  эВ является перспективным материалом для применения с тандемных СЭ на основе кремниевых фотовольтаических элементах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-42-10029, <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>

### Список литературы

1. Green MA, Dunlop ED, Hohl-ebinger J, Yoshita M, Kopidakis N, Hao X. Solar cell efficiency tables (version 59). *Prog Photovolt Res Appl* 2022;30:3-12.
2. Овезов, МК; Рябко, АА; Алешин, АН; Мошников, ВА; Кондратьев, ВМ; Максимов, АИ Вольтамперные характеристики перовскитных пленок  $\text{MAPbI}_3$ , сформированных одностадийным методом центрифугирования. *НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки*, т.16, 4, 2023, с. 9 – 19 <https://doi.org/10.18721/JPM.16401>
3. Wang H, Sun Y, Chen J, Wang F, Han R, Zhang C, Kong J, Li L, Yang J. A Review of Perovskite-Based Photodetectors and Their Applications. *Nanomaterials (Basel)*. 2022 Dec 9; 12(24):4390.
4. Sakhatskyi, K., Turedi, B., Matt, G.J. et al. Stable perovskite single-crystal X-ray imaging detectors with single-photon sensitivity. *Nat. Photon.* 17, 510–517 (2023).
5. Zhao, X., Xu, H., Wang, Z., Lin, Y., & Liu, Y. (2019). Memristors with organic-inorganic halide perovskites. *InfoMat*, 1(2), 183–210. Portico. <https://doi.org/10.1002/inf2.12012>
6. Wang, J., Zhang, J., Zhou, Y., Liu, H., Xue, Q., Li, X., & Jen, A. K. (2020). Highly efficient all-inorganic perovskite solar cells with suppressed non-radiative recombination by a Lewis base. *Nature communications*, 11(1), 177.
7. Su, K., Chen, W., Huang, Y., Yang, G., Brooks, K.G., Zhang, B., Feng, Y., Nazeeruddin, M.K. and Zhang, Y. (2022), In Situ Graded Passivation via Porphyrin Derivative with E Enhanced Photovoltage and Fill Factor in Perovskite Solar Cells. *Sol. RRL*, 6: 2100964. <https://doi.org/10.1002/solr.202100964>
8. Feng, W., Tan, Y., Yang, M., Jiang, Y., Lei, B.-X., Wang, L., & Wu, W.-Q. (2022). Small amines bring big benefits to perovskite-based solar cells and light-emitting diodes. *Chem*, 8(2), 351–383. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2021.11.010>
9. Azmi R, Ugur E, Seitkhan A, et al. Damp heat-stable perovskite solar cells with tailored-dimensionality 2D/3D heterojunctions. *Science* 2022;376:73-7
10. Leung, T.L., Ahmad, I., Syed, A.A. et al. Stability of 2D and quasi-2D perovskite materials and devices. *Commun Mater* 3, 63 (2022).

## МЕТОД ПРОФИЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИЛЬЯМСОНА-ХОЛЛА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВКЛАДОВ В УШИРЕНИЕ РЕФЛЕКСОВ

Поляков Д.Д., Сухорученков К.В.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе проводится литературный обзор применения профильного метода Вильямсона-Холла для анализа кристаллических материалов. Рассматриваются основные уточняемые параметры и соотношения для рефлексов различного типа.

*Ключевые слова:* рентгеноструктурный анализ, метод Вильямсона-Холла, дифрактограмма

### Введение

Дифрактограмма любого материала состоит из рефлексов, положение которых зависит от структуры и состава исследуемого вещества. В идеальном случае рефлекс должен быть дельта-функцией, но на практике он уширяется из-за наличия микродеформаций в структуре, конечного размера области когерентного рассеяния (ОКР) и инструментального фактора. Последний из них возможно определить с помощью эксперимента, а вклад размеров ОКР и микродеформаций необходимо разделять. Для решения этой задачи предложены профильные (определяют параметры каждого рефлекса) и полнопрофильные (описывают дифрактограмму целиком) методы. Одним из самых известных является профильный метод Вильямсона-Холла (WHP).

### Метод Вильямсона-Холла

Из формулы Шеррера следует, что ширина на половине высоты рефлекса обратно пропорциональна размеру кристаллита. Из неё можно определить размеры ОКР [1].

$$FWHM_{size} = \frac{K_{size} \cdot \lambda}{D \cdot \cos(\theta)} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\theta$  – угол Вульфа-Брэгга,  $FWHM_{size}$  – увеличение полуширины за счёт размера ОКР,  $K_{size}$  – константа Шеррера, зависящая от формы кристаллитов. Вместо  $FWHM_{size}$  в формуле (1) можно использовать интегральную ширину  $\beta_{int\ size}$ .

Константа Шеррера зависит от способа определения ширины рефлексов ( $FWHM$  или  $\beta_{int}$ ), формы кристаллитов и их распределения по размерам. Обычно она находится в диапазоне 0,81-1,07. При использовании  $FWHM$  для сферических кристаллитов кубической сингонии она определяется следующей формулой [2,3]:

$$K_{size} = 2 \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \approx 0,94$$

Для определения вклада микродеформаций используют уравнение Стокса – Уилсона. Из него можно найти относительную деформацию.

$$FWHM_{strain} = K_{strain} \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg}(\theta) \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол Вульфа-Брэгга,  $FWHM_{strain}$  – увеличение полуширины за счёт микронапряжений,  $K_{strain}$  – константа Стокса-Уилсона.

Для микродеформаций  $\Delta d/d$  в кристаллитах выбирается  $K_{strain} = 4$  [4,5]. Рассматривают два крайних значения шага решетки  $d$  ( $d + \Delta d$  и  $d - \Delta d$ ) при  $\varepsilon = \Delta d/d$ . Значение будет верным, если в этом диапазоне выполняется закон Брэгга и части образца дифрагируют независимо.

Факторы уширения  $FWHM_{size}$  и  $FWHM_{strain}$  влияют сильнее при увеличении угла дифракции. На дифрактограмме это будет отражаться в уширении рефлексов на дальних углах.

Для определения параметров ОКР и микродеформаций необходимо разделить вклад каждой величины в уширение. В зависимости от типа рефлекса вклады описываются различными зависимостями. В таблице 1 показана связь итоговой полуширины для различных функций, соотношения получены с помощью свертки функций [6].

Таблица 1

#### Описание вклада ОКР и микронапряжений в уширение

Тип	Описание вклада ОКР и микронапряжений
G	$FWHM_{corr} = FWHM_{size}^2 + FWHM_{strain}^2$
L	$FWHM_{corr} = FWHM_{size} + FWHM_{strain}$
pV	$FWHM_{corr} = FWHM_{size} + FWHM_{strain}^2 / FWHM_{corr}$

Инструментальное уширение  $FWHM_{instr}$  будет вносить различный вклад для каждой функции. В таблице 2 показаны формулы, позволяющие получить скорректированную на инструмент полуширину  $FWHM_{corr}$ .

Таблица 2

Описание вклада инструментального фактора в уширение

Тип	Вклад инструмента
G	$FWHM_{corr} = FWHM_{obs}^2 - FWHM_{instr}^2$
L	$FWHM_{corr} = FWHM_{obs} - FWHM_{instr}$
pV	$FWHM_{corr} = [(FWHM_{obs} - FWHM_{instr}) \cdot (FWHM_{obs}^2 - FWHM_{instr}^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}}$

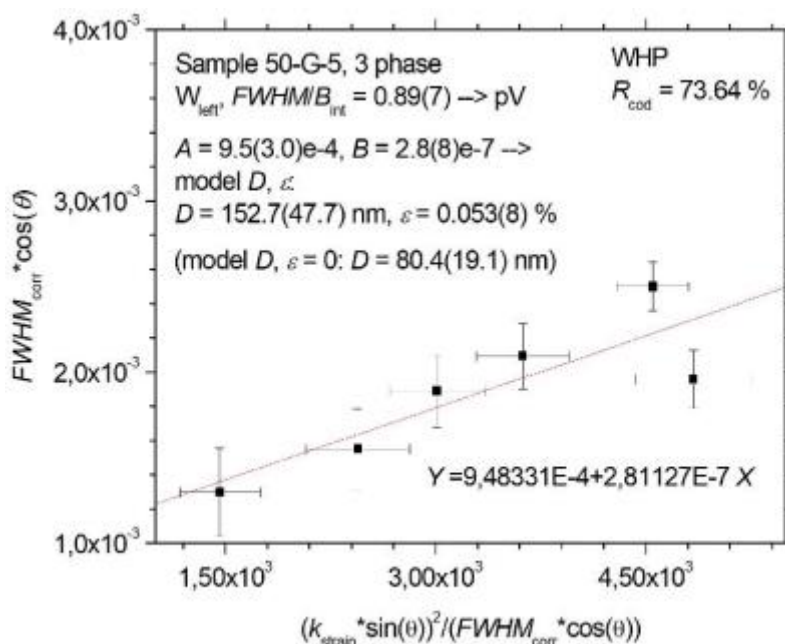


Рис. 1. График Вильямсона-Холла для pV рефлекса, определение ОКР и микродеформаций

Значение  $FWHM_{instr}$  получается из опытов. Чаще всего её удается получить с помощью выбора материала с самыми узкими рефлексами. Тогда в первом приближении можно считать, что эти значение близки к аппаратному уширению установки. Данные записывают в файл и используют при расчетах. Вильямсон и Холл предложили построение графика аппроксимирующей линейной функции, из которой возможно определение вкладов ОКР и микронапряжений для рефлексов с Лоренцевским профилем. Далее показаны получения таких графиков для различных типов функций:

1. Функция Лоренца, оригинальный метод WHP

$$FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta) = \frac{K_{size} \cdot \lambda}{D} + \epsilon \cdot K_{strain} \cdot \sin(\theta) \quad (3)$$



По вертикальной оси откладывается  $FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta)$ , а по горизонтальной –  $K_{strain} \cdot \sin(\theta)$ . Далее происходит аппроксимация линейной зависимостью для нахождения тангенса угла наклона прямой и пересечения с вертикальной осью. Тангенс даёт вклад микродеформаций, а пересечение – вклад ОКР.

2. Функция Гаусса, модифицированный метод WHP

$$FWHM_{corr}^2 \cdot \cos^2(\theta) = \frac{K_{size}^2 \cdot \lambda^2}{D^2} + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 \cdot K_{strain}^2 \cdot \sin^2(\theta) \quad (4)$$

По вертикальной оси откладывается  $FWHM_{2corr} \cdot \cos^2(\theta)$ , а по горизонтальной –  $K_{strain}^2 \cdot \sin^2(\theta)$ .

3. Функция псевдо-Войта, модифицированный метод WHP

$$FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta) = \frac{K_{size} \cdot \lambda}{D} + \frac{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 \cdot K_{strain}^2 \cdot \sin^2(\theta)}{FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta)} \quad (5)$$

По вертикальной оси откладывается  $FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta)$ , а по горизонтальной оси –  $K_{strain}^2 \cdot \sin^2(\theta) / (FWHM_{corr} \cdot \cos(\theta))$ .

На рисунке 1 показан пример построения графика Вильямсона-Холла с определением размера ОКР и микродеформаций. Параметр  $R_{cod}$  показывает % совпадения точек.

### Заключение

В заключение можно сказать, что метод Вильямсона-Холла является одним из способов разделения вкладов размера ОКР и микродеформаций при расчете дифрактограммы образцов. Ранее нами метод активно применялся в исследованиях по расчету пластин вольфрама, облученных плазмой [7]. Для корректных расчетов следует определить тип рефлекса и выбрать необходимые константы, исходя из свойств исследуемого материала, а также выявить инструментальное уширение. Актуальность применения рассмотренных моделей в экспериментальной практике исследования наноматериалов [8-11] представляется важной, так как в учебном процессе обучающиеся знакомятся только с самым простым приближением Шеррера [12].

### Список литературы

1. R. A. Young, A. Sakthivel, T. S. Moss, C. O. Paiva-Santos, J. Appl. Cryst. 28 (1995) 366.
2. J. L. Langford, R. Delhez, Th.H. de Keijser, E. J. Mittemeijer, „Profile Analysis for Microcrystalline Properties by the Fourier and Other Methods”, Aust. J. Phys., 41 (1988) 173-187
3. B.E. Warren „X-ray Diffraction“, Edition: reprint, Courier Dover Publications, NY, 1990, 381 p.
4. A. R. Stokes, A. J. C. Wilson, “The diffraction of X-rays by distorted crystal aggregates”, Proc. Phys. Soc. London 56 (1944) 174-181
5. Manual to Rietveld program „Topas“, Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, 2000
6. G. K. Williamson, W. H. Hall, Acta Metallurg. 1 (1953) 22-31
7. Поляков Д.Д. Рентгеноструктурный анализ материала на основе вольфрама первой стенки дивертора токамака. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022
8. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы/под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 552 с.
9. Наночастицы, наносистемы и их применение. Формирование наносистем для сенсорики и медицины / под ред. Мошников В.А., Максимова А. И.. СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. 200 с.
10. Бобков А.А., Кононова И.Е., Мошников В.А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. 208 с.
11. Нанотехнологии и наноматериалы: Получение, исследование, моделирование /под ред Аверина И.А., Мошников В. А. Лабораторный практикум. Пенза, Пензенский ГУ, 2018. 80с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ПРИ ЕГО ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

ПОТАПОВ М.А., АДАМОВИЧ Д.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический*

*университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе моделируются структуры полимерного материала полиакрилонитрила на различных этапах его термической обработки. Расчет структур произведен с использованием программного обеспечения ChemOffice. Физический образец в виде пленки получен из раствора полиакрилонитрила в диметилформамиде методом полива с термическим нагревом. Анализ раствора проведен при помощи ультрафиолетовой спектроскопии.

*Ключевые слова:* полиакрилонитрил, ультрафиолетовая спектроскопия, молекулярное моделирование, метод ММ2, ChemOffice, полимерные структуры, органический полупроводник, полимерный полупроводник

Современные материалы электроники и методы их получения находятся в непрерывном развитии. Исследование наноматериалов и органических полупроводников позволило расширить границы применения материалов в электронных устройствах, добившись более стабильных характеристик, недорогостоящего производства и простоты технологии. Изучение процессов, происходящих в материале и ведущих к получению необходимых параметров, позволяет более глубоко понять природу этих процессов и найти новые способы использования данных материалов, или усовершенствовать уже известные.

Исходный объект моделирования – пленки полиакрилонитрила (ПАН). Помимо моделей пленки на различных этапах термической обработки представлены модели раствора на основе наблюдаемых в ходе УФ-спектроскопии параметров [3]. Термическая обработка полимера проходит 3 стадии: получение пленки, нагрев пленки в кислородсодержащей атмосфере и пиролиз – термическая обработка в вакууме, после которой материал приобретает полупроводниковые свойства [2]. В результате термической обработки происходит циклизация ПАН (рисунок 1). Методика молекулярного моделирования ММ2 в программном обеспечении ChemOffice основана на использовании потенциальных полей, создаваемых атомами рассчитываемого кластера и подбора настроек интерфейса, что позволяет произвести моделирование структуры органических молекул и структур, содержащих атомы углерода.

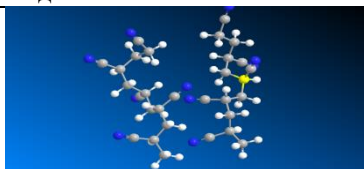
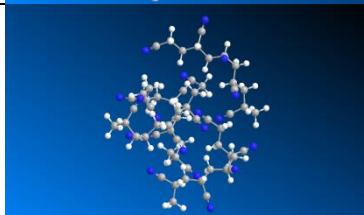
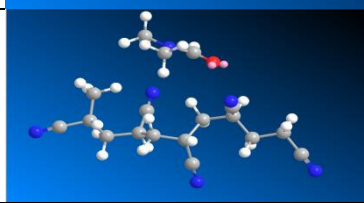



Рис. 1. Образец на различных этапах обработки: а – получение пленки, б – термическая обработка в атмосфере, в – пиролиз образца

На первом этапе проведено моделирование кластера нескольких молекул ПАН в растворе с диметилформамидом (ДМФА) и рассмотрение спектрограмм. В системе из нескольких линейных молекул ПАН существует энергетически выгодная конфигурация: несколько молекул начинают формировать сферический агрегат, т.к. взаимодействие между цепочками полимера, образующих сферу, словно клубок, ведет к уменьшению свободной энергии системы. В таком состоянии общая энергия по мере увеличения числа молекул в системе уменьшается. Данное явление можно наблюдать на УФ-спектрограмме – появление не нулевой линии в видимой области длин волн (рисунок 2), раствор становится менее прозрачным, такой сферический конгломерат создает мутные сгустки в растворе. Полиакрилонитрил растворим в диметилформамиде [1], что подтверждается энергетической выгодностью взаимодействия системы ПАН/ДМФА. В сравнении с растворителем диметилацетамидом (ДМАА) значения общей энергии системы меньше у ПАН/ДМФА, чем у ПАН/ДМАА. Меньшее значение общей энергии объясняется тем, что у ДМФА больше дипольный момент, т.к. у ДМАА присутствует на одну [-СН] группу больше. Оптимальное расстояние между молекулами в системе ПАН/ДМФА больше, чем в ПАН/ДМАА и составляет 2,63 Å в сравнении с 2,55 соответственно. При увеличении числа молекул ПАН в системе происходит увеличение расстояния между молекулами ПАН и растворителя: 2,88 Å для ДМФА и 2,62 Å для ДМАА. Модели представлены в таблице 1.

Таблица 1

Модели ПАН в растворе

Структура	Модель	Е общая, ккал/моль
2 молекулы ПАН		31,4364
4 молекулы ПАН		29,7352
ПАН/ДМФА		11,2359
ПАН/ДМАА		14,6896

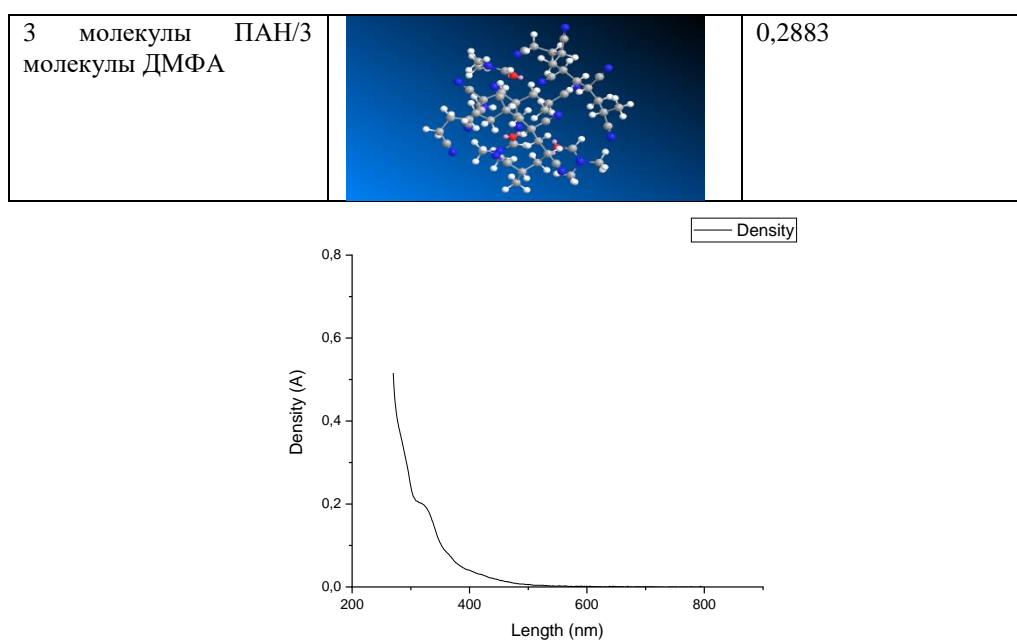
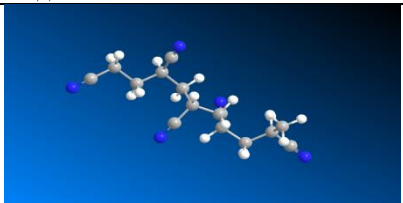
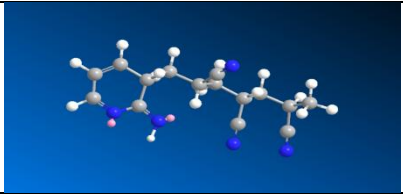



Рис. 2. УФ-спектр раствора ПАН

На втором этапе проведен анализ переходных моделей ПАН. Полимеризация ПАН при термической обработке происходит в результате образования циклов с участием азота [4]. Образованию таких структур способствует внедрение кислорода в структуру (окисление). Образование циклической структуры начинается с зародыша из 3-5 колец, о чем свидетельствует уменьшение общей энергии при наличии 3 циклических звеньев – энергия достигает своего минимума. Данная закономерность подтверждается и на примере 7 звеньев ПАН. Модели приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Переходные модели ПАН**

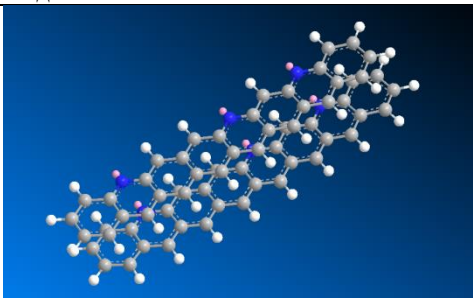
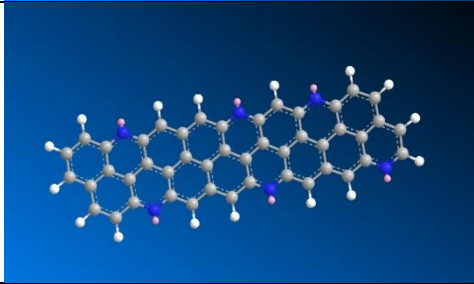
Структура	Модель	E общая, ккал/моль
ПАН		24,7185
ТПАН		29,4364
ПАН с 1 кольцом		23,8398
ПАН с 2 кольцами		22,8799

ПАН с 3 кольцами		22,1244
ПАН с 4 кольцами		25,076

На третьем этапе проведено моделирование циклической структуры ПАН после пиролиза. В полной циклической структуре наблюдается зависимость total energy от конфигурации: при большем упорядочении молекулы значение total energy уменьшается, что говорит об энергетической выгоде перехода из аморфного состояния к упорядоченному. Образование целой молекулы ведет к понижению общей энергии, как и изменение конфигурации молекулы в более компактную. Модели представлены в таблице 3.

Таблица 3

Циклические модели ПАН

Структура	Модель	Е общая, ккал/моль
2 молекулы циклического ПАН		19,0497
Единый циклический ПАН		11,2937

Полученные и проанализированные модели показывают обоснованность используемой технологии и предполагают дальнейшее ее совершенствование, например использование инфракрасного нагрева или другого растворителя для оптимизации времени производства и получения необходимых характеристик готового полупроводникового материала.

### Список литературы

1. Лебедев, Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза/ Н.Н. Лебедев. – 3-е изд., перераб. – М.: Химия, 1975.
2. В. В. Козлов, В. Г. Костишин, М. А. Ситнов, Б. С. Годаев, Исследование свойств нанокompозитов на основе термообработанного полиакрилонитрила. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2022. Том 88
3. Л. А. Казицына, Н. Б. Куплетская, «Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектропии в органической химии» - издательство Московского университета, 1979

4. В. В. Козлов, А. А. Васильев, И. Г. Горичев, А. Т. Калашник, В. Г. Костишин, Ф. С. Табаров, Б. С. Гошаев, М. А. Ситнов – Исследование свойств стабилизированного полиакрилонитрила на воздухе – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2021. Том 97

## ПРАКТИЧЕСКИЕ СТОРОНЫ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ В ЭКОЛОГИИ И ФОТОКАТАЛИЗЕ

РАДАЙКИН Д.Г.<sup>1,2</sup>, ДЖУРАЕВА Е.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*АО «НИТИ» Авангард*

**Аннотация.** Глобальное потепление, энергетический кризис и загрязнение окружающей среды являются серьезными проблемами, влияющими как на здоровье человека, так и на окружающую среду. В связи с этим можно выделить одно из направлений – 3D-печать. Трехмерная печать является мощным инструментом, позволяющим создавать сложные геометрические объекты, которые найдут применение в области фотокатализа.

*Ключевые слова:* фотокатализ, экология, 3D-печать

Глобальное потепление, энергетический кризис и загрязнение окружающей среды являются серьезными проблемами, влияющими как на здоровье человека, так и на окружающую среду. Загрязнение окружающей среды включает в себя широкий спектр опасных химических веществ, которые вредны даже при крайне низких концентрациях. В настоящее время остро стоит вопрос о разработки высокоэффективных методах нейтрализации загрязняющих веществ.

Установки по очистке сточных вод не предназначены для удаления низких концентраций синтетических загрязнителей, таких как фармацевтические препараты, и поэтому для решения этой экологической проблемы используются альтернативы, такие как передовая технология окисления [1-3]. В данной работе будет сделан акцент на фотокатализе, дополненном 3D-печатью, как на одном из перспективных направлений в технологии окисления.

Гетерогенные фотокаталитические процессы основаны на окислении загрязняющих соединений, которые могут быть обнаружены в воздухе или воде, посредством реакции, происходящей на каталитической поверхности полупроводника, активированной светом с определенной длиной волны.

ZnO является одним из эффективных полупроводниковых материалов для использования в фотокатализе. Последние достижения в области материаловедения позволяют использовать различные методы модификации свойств материала для улучшения характеристик фотокатализаторов [4]. Создание гетероперехода, легирование [5], осаждение наночастиц металлов [6-8] и изменение морфологии поверхности нашли широкое применение как приемы улучшения характеристик материала [9].

Стоит отметить, что порошковая форма катализатора обладает высокой активностью за счет большой удельной поверхности, но при этом имеет существенный недостаток, связанный с экстракцией из реакционной среды. Одним из путей решения этой проблемы является иммобилизация катализатора на структурированном материале. В этом смысле новым интересным подходом к производству структурированных материалов может стать использование системы 3D-печати.

3D-печать имеет высокий потенциал использования в области фотокатализа [10-13]. 3D-печать, также известная как аддитивная технология, позволяет создавать структуры на основе цифровых моделей, что требует меньше шагов и ресурсов. Для печати активных катализаторов или реакторов используются методы 3D-печати, такие как моделирование методом послойного наплавления (FDM), прямое письмо чернилами (DIW), лазерная стереолитография (SLA) и селективное лазерное плавление (SLM). 3D-печать обеспечивает новый подход к созданию сложных геометрических подложек, которые позволяют настраивать структуры с большой удельной площадью поверхности, значительно увеличивая скорость диффузии реактивных частиц внутри пористой структуры с высокой доступностью активных центров, тем самым улучшая фотокаталитические характеристики [14-15]. Кроме того, имеется возможность использовать прозрачные материалы для печати подложки, что приведет к повышению эффективности переноса квантов света в реакционной системе. Более того, 3D-печать может снизить сложность проектирования фотокаталитических подложек и минимизировать потребление сырья при более низких затратах [16].

В недавних исследованиях были отмечены практические достижения в области применения трехмерной печати в фотокатализе. Тицзин и др. [17] подчеркнули применение 3D-печати для изготовления мембран, катализаторов и адсорбентов. Сайдулу и др. [18] рассмотрели последние достижения в области применения 3D-печати в различных физико-химических и биологических методах очистки сточных вод. В целом систематический обзор различных типов фотокаталитических материалов и структур подложек для 3D-печати в каталитических приложениях до сих пор отсутствует.

Также технология трехмерной печати может быть использована для обеспечения экологической стабильности. Уровень качества воздуха имеет большое значение в чрезвычайных ситуациях, таких как войны, биологические войны, стихийные бедствия и пандемические ситуации. Чтобы спасти людей, их помещают в закрытые помещения, в которых поддержание высокого качества воздуха имеет важное значение. В случае пандемий закрытые общественные места должны быть свободными от микробов, и это возможно благодаря использованию технологий 3D-печати. В настоящее время проводятся исследования по созданию экологически чистых систем контроля качества воздуха. Саламоне и др. изготовили экологически чистые наносистемы для поддержания качества воздуха в помещениях [19]. В системе использовались платы Arduino и некоторые датчики, которые позволяли создавать недорогие системы, напечатанные на 3D-принтере. Ван и др. разработали трехмерную систему мониторинга уровня твердых частиц в воздухе [20].

Как уже было сказано выше, 3D-печать можно использовать для изготовления фильтров удаляющие загрязняющие вещества. Сюй и др. внесли свой вклад, разработав воздушный фильтр для удаления монооксида азота из воздуха [21]. Результаты показали, что с помощью этого фильтра было удалено 52,6% NO. Такие наносистемы, изготовленные при помощи 3D-печати, можно размещать в закрытых общественных местах для мониторинга качества воздуха в помещениях.

Для подготовки специалистов в этой области науки «настоящего и будущего» в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» накоплен значительный опыт, а качество подготовки возросло с открытием совместного с ООО «НТ-МДТ» Центра сканирующей микроскопии. Пионерские работы с участием ООО «НТ-МДТ» известны с начала 2000-х [22], а в настоящее время в совместных работах СПбГЭТУ «ЛЭТИ» с ИХС РАН 3D-печать

используется для получения таких новых материалов наноархитектоники, как трижды периодические поверхности с минимальной энергией [23]. Из диссертационных работ, защищенных нашими аспирантами за последние 5 лет по тематикам, связанным с аддитивными технологиями получения иерархических структур, можно выделить работы [24-25], а для самостоятельного изучения особенностей синтеза – учебное пособие-монографию [26].

### Заключение

3D-печать имеет огромный потенциал во многих областях, особенно в экологии. Благодаря трёхмерному моделированию можно создавать сложные объекты с высокой удельной поверхностью. Модифицируя эти объекты активными полупроводниковыми материалами, можно получить высокоэффективный гетерогенный фотокатализатор.

### Список литературы

1. Радайкин Д.Г. Проблема микропластика и методы ее устранения // Наука настоящего и будущего. 2023. № 1. С. 192-195.
2. Радайкин Д.Г. Обзор передовых процессов окисления для очистки органических сточных вод // Наука настоящего и будущего. 2023. № 1. С. 188-192.
3. Радайкин Д.Г., Бобков А.А. Обзор достижений в области очистки сточных вод // Наука настоящего и будущего. 2022. № 1. С. 121-125.
4. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов (2-е издание) / Мошников В.А [и др.]. СПб.:Элмор, 2008. 255 с.
5. Бобков А.А., Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитических свойств наноструктур оксида цинка, легированных магнием // Сборник научных трудов «Нанofизика и Наноматериалы». 2021. С. 34-42.
6. Sorption analysis of composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science / Maraeva E., Radaykin D. [et al]. // *Chimica Techno Acta*. 2022. Vol. 9. №. 4. 20229422.
7. Радайкин Д.Г., Бобков А.А., Мошников В.А. Исследование влияния внедренных наночастиц серебра на фотокаталитическую активность ZnO // НАУЧНЫЙ АЛЬМАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ. 2022. № 1-9. С. 12-20.
8. Радайкин Д.Г. Исследование фотокаталитической активности частиц оксида цинка, модифицированных наночастицами серебра // Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2022", секция "Химия". 2022. С. 292.
9. Радайкин Д.Г., Бобков А.А. Синтез и исследование фотокатализатора ZnO, полученного золь-гель методом, на пористом субстрате // НАУЧНЫЙ АЛЬМАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ. 2022. С. 46-57.
10. Photo-curing 3D printing technique and its challenges / Quan H. [et al]. // *Bioact. Mater.* 2020. Vol. 5. №. 1. P. 110-115. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003.
11. 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer / Borrello J. [et al]. // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 23. P. 374-380. DOI: 10.1016/j.addma.2018.08.019.
12. Effects of slurry mixing methods and solid loading on 3D printed silica glass parts based on DLP stereolithography / Cai P. [et al]. // *Ceram. Int.* 2020. Vol. 46. № 10. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.03.260.
13. Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques / Low Z.X. [et al]. // *J. Membr. Sci.* 2017. Vol. 523. P. 596-613. DOI: 10.1016/j.memsci.2016.10.006.
14. Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators / Lee B.X. [et al]. // *J. Publ. Health Pol.* 2016. Vol. 37. P. 13-31. DOI: 10.1057/s41271-016-0002-7.
15. Current progress on 3D graphene-based photocatalysts: from synthesis to photocatalytic hydrogen production / Shah N.R.A.M. [et al]. // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. Vol. 46. № 14. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.089.
16. A critical review on the development of metal-organic frameworks for boosting photocatalysis in the fields of energy and environment / Swetha S. [et al]. // *J. Clean. Prod.* 2021. Vol. 333. A. 130164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130164.
17. 3D printing for membrane separation, desalination and water treatment / Tijing L.D. [et al]. // *Appl. Mater. Today.* 2020. Vol. 18. № 8. A. 100486. DOI: 10.1016/j.apmt.2019.100486.
18. Enhancement of wastewater treatment performance using 3D printed structures: a major focus on material composition, performance, challenges, and sustainable assessment / Saidulu D. [et al]. // *J. Environ. Manag.* 2022. Vol. 306. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114461.



19. Design and Development of nEMoS, an All-in-One, Low-Cost, Web-Connected and 3D-Printed Device for Environmental Analysis / Salamone F. [et al]. // *Sensors*. 2015. Vol. 15. P. 13012–13027. DOI: 10.3390/s150613012.
20. AP4.1 - Miniaturized 3D Printed Particulate Matter Sensor for Personal Monitoring / Wang Y. [et al]. // *IMCS* 2018. 2018. P. 402–403. DOI: 10.5162/IMCS2018/AP4.1.
21. 3D-Printed Grids with Polymeric Photocatalytic System as Flexible Air Filter / Xu X. [et al]. // *Appl. Catal. B*. 2020. Vol. 262. A. 118307. DOI: 10.1016/j.apcatb.2019.118307.
22. Ink-jet printing of electron donor/acceptor blends: towards bulk heterojunction solar cells / Marin V. [et al]. // *Macromolecular Rapid Communications*. 2005. T. 26. C. 319.
23. High-throughput screening of 3d-printed architected materials inspired by crystal lattices: procedure, challenges, and mechanical properties / Arsentev M.Yu., Sysoev E.I. [et al]. // *ACS Omega*. 2023. T. 8. № 28. C. 24865-24874.
24. Пермяков Н.В. Развитие аппаратно-методических средств атомно-зондовой технологии для получения и диагностики наноразмерных объектов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт Петербург. 2018.
25. Рябко А.А. Физико-технологические основы формирования гибридных наносистем "наностержни оксида цинка – коллоидные квантовые точки": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург. 2022.
26. Мошников В.А., Максимов А.И. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы: монография. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. 220 с.

## **КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РОСТА ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕТРОСКОПИИ И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

РЕМЕЛЕ В.Е.<sup>1,2</sup>, КУЗЬМИН М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*

<sup>2</sup>*ФТИ им. А.Ф.Иоффе*

**Аннотация.** В этой работе излагается общий подход для количественного анализа процессов роста пленок по механизмам Странского-Крастанова и Фольмера-Вебера. Предложена модель, позволяющая получать данные о морфологии пленок и форме трехмерных островков. При помощи изложенного формализма проведен анализ роста островков дисилицида самария в пленочной системе Sm-Si(111) при различных температурах.

*Ключевые слова:* Электронная спектроскопия, островковый механизм роста, механизм Странского – Крастанова, редкоземельные элементы, кремний

Определение морфологии пленки является важным аспектом как в научных, так и в технологических задачах. Современная наука и техника предлагают большое количество экспериментальных методов, позволяющих производить исследования морфологии поверхности, одними из которых являются сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопии (СТМ и АСМ). Эти методы, однако, имеют ряд свойственных им недостатков; так, первый из них дает хорошие результаты в основном на поверхностях с низкой шероховатостью (на атомном уровне) и достаточной высокой проводимостью. Кроме того, эти методы практически не могут «заглянуть» под поверхностный атомный слой. В связи с этим возникает потребность в методах, которые способны изучать морфологию пленки не только в самых верхних слоях, но и на некоторую глубину. Для этой цели эффективными являются методы электронной спектроскопии, например, ЭОС, РФЭС и другие. Используя эти методы, можно регистрируя зависимости интенсивности сигналов напыляемого материала и подложки от толщины растущей пленки, исследовать

ее морфологию[1]. Так можно идентифицировать, например островковый или послойный механизмы роста, а также определить некоторые их особенности, например меру вытянутости островков. До настоящего времени такой анализ проводился на качественном уровне, что не позволяло получать многою информацию, например, о форме островков. По этой причине, возникает потребность исследовать количественно эти зависимости и в этой работе предлагается общий подход к расчету указанных выше зависимостей.

Перед тем как приступить к изложению формализма, сформулируем модельные представления, которые мы будем использовать для получения теоретического результата. В рамках этой работы мы будем рассматривать пленки, растущие либо по островковому механизму, либо по механизму Странского – Крастанова, при это будем считать, что островки являются непрерывными и имеют форму полуэллипса (это строго говоря не обязательно, о чем будет сказано несколько ниже), а пленка на подложке может быть представлена как структура, которая получается трансляцией элементарной ячейки, в которой находится островок заданной формы. Таким образом вместо того, чтобы рассматривать процессы на всей поверхности подложки мы будем рассматривать процессы в элементарной ячейке, которые затем будем распространять на всю подложку.

Теперь перейдем к изложению формализма, как уже было сказано ранее описание пленки сводится к описанию элементарной ячейки, которую мы зададим с помощью уравнения, которое описывает квадрат со стороной  $L$  с точкой в точке начала координат:

$$|x + y| + |y - x| \leq L \cap z \geq 0$$

В пределах этой ячейки находится островок полуэллиптической формы, в выбранной системе координат поверхность, соответствующая форме островка, задается формулой:

$$H(x, y, N) = \gamma(N) \sqrt{1 - \frac{x^2}{\alpha(N)^2} - \frac{y^2}{\beta(N)^2}}$$

Очевидно, что полуоси полуэллипсоида зависят от покрытия, осажденного на подложку адсорбата  $N$ . Приравняв сплошную пленку объема  $V(N) = d_f NS$ , где  $d_f$  – толщина монослоя пленки, а  $S$  – площадь подложки, к объему полуэллипсоида найдем связь его полуосей с покрытием:

$$\alpha(N) = \sqrt[3]{\frac{3d_f NL^2}{2\pi mn}}$$

Где  $n$  и  $m$  коэффициенты формы, задаваемые уравнениями  $\beta(N) = n\alpha(N)$  и  $\gamma(N) = m\alpha(N)$ . Примем для простоты  $n = 1$ . Зная это, можно вычислить и сигнал от подложки – его можно представить в виде  $I_{sub}(N) = I_{sub}^{scr}(N) + I_{sub}^{unscr}(N)$ , где  $I_{sub}^{scr}(N)$  – часть подложки экранированная островком, а  $I_{sub}^{unscr}(N)$  – часть подложки, которая не находится под островком. Положив, что  $I \sim S$ , получим, что:

$$I_{sub}^{unscr}(N) = I_0 \frac{L^2 - \int_{-L}^L \int_{-L}^L g(x, y, N) dx dy}{L^2}$$

Где  $g(x, y, N)$  – функция площади, а  $I_0$  – сигнал от чистой подложки:

$$g(x, y, N) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x + y| + |x - y| \leq L \cap x^2 + y^2 \leq \alpha(N)^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Здесь мы использовали тот факт, что в основании полуэллипсоида лежит окружность ( $n = 1$ ). Для нахождения сигнала  $I_{sub}^{scr}$  выделим на подложке элементарную площадь  $dx dy$ . Сигнал, который она создает, с учетом экранировки, равен  $\frac{dx dy}{L^2} I_0 \exp(-\frac{H(x, y, N)}{\lambda_f})$ . Тогда сигнал от всей подложки под островком очевидно равен:

$$I_{sub}^{scr}(N) = \frac{I_0}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \rho(x, y, N) dx dy$$

где  $\lambda_f$  – длина свободного пробега частицы в пленке,  $\rho(x, y, N)$  равна:

$$\rho(x, y, N) = \begin{cases} \exp(-H(x, y, N)/\lambda_f) & \text{if } |x + y| + |x - y| \leq L \cap x^2 + y^2 \leq \alpha(N)^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Приняв нормировку  $I_0 = 1$  найдем сигнал от подложки:

$$I_{sub}(N) = \frac{1}{L^2} (L^2 + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} [\rho(x, y, N) - g(x, y, N)] dx dy)$$

Аналогично можно найти и сигнал для адсорбата, только в этом случае нужно выделять элементарный объем, а не площадь. Сигнал адсорбата  $I_{film}$  можно вычислить с помощью соотношения:

$$I_{film}(N) = \frac{I_{ML}}{L^2 d_f} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{\gamma(N)} \rho'(x, y, z, N) dx dy dz$$

$$\text{Где } \rho'(x, y, z, N) = \begin{cases} \exp(-z + H(x, y, N)) & \text{if } |x + y| + |x - y| \leq L \cap x^2 + y^2 \leq \alpha(N, z)^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$I_{ML}$  – величина сигнала от одного монослоя, определим ее через соотношение:

$$I_0 = \lim_{n \rightarrow +\infty} I_{ML} \int_0^{nd_f} \frac{dh}{d_f} \exp[-\frac{(nd_f - h)}{\lambda_f}] = 1$$

А функция  $\alpha(N, z)$  представляет собой радиус окружности, которая является сечением одноосного полуэллипсоида на высоте  $z$ :

$$\alpha(N, z) = \alpha(N) \frac{\sqrt{\gamma(N)^2 - z^2}}{\gamma(N)}$$

Рассмотрим теперь механизм Странского – Крастанова для случая  $0 < N_{wet} \leq 1$ . В общем виде сигнал адсорбата в этом случае можно представить в виде:

$$I'_{film}(N) = \begin{cases} \frac{d_f}{\lambda_f} N & \text{if } N \leq N_{wet} \\ I'_{film}(N) = I_{wet}^{scr}(N) + I_{wet}^{unscr}(N) + I_{isl}(N) & \text{if } N > N_{wet} \end{cases}$$

где  $I_{wet}^{scr}(N)$  – сигнал от экранированной части смачивающего слоя,  $I_{wet}^{unscr}(N)$  – сигнал от неэкранированной части смачивающего слоя,  $I_{isl}(N)$  – сигнал непосредственно от островка. Используя предыдущие результаты, можно показать, что

$$I_{wet}^{scr}(N) + I_{wet}^{unscr}(N) = \frac{d_f}{L^2 \lambda_f} N_{wet} (L^2 + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} [\rho(x, y, N) - g(x, y, N)] dx dy)$$

$I_{isl}(N) = I_{film}(N)$  с поправкой на то, что нижний предел интегрирования должен быть заменен с 0 на  $N_{wet} d_f$ .

Аналогично можно найти сигнал и для подложки, который будет равен:

$$I'_{sub}(N) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{d_f}{\lambda_f} N\right) & \text{if } N \leq N_{wet} \\ \exp\left(-\frac{d_f}{\lambda_f} N_{wet}\right) \frac{1}{L^2} (L^2 + \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} [\rho(x, y, N) - g(x, y, N)] dx dy) & \text{if } N > N_{wet} \end{cases}$$

Теперь рассмотрим использование изложенного формализма для анализа экспериментальных результатов, полученных для пленочных систем. В качестве примера рассмотрим систему Sm-Si(111). В этой системе, во-первых, рост пленки происходит по механизму Странского-Крастанова, и во-вторых, форма растущих островков сильно зависит от температуры, при которой производится напыление[2]. Кроме того, растущая пленка имеет слоистую структуру, т.е., во всей рассматриваемой в настоящей статье области температур пленка образована кристаллитами эпитаксиального дисилицида самария, структура которого от температуры не зависит[3]. Для учета этого введем прединтегральный множитель  $\theta = \frac{d_f}{d_f + 2d_s}$ , а длину свободного пробега будем вычислять аналогично предыдущей работе  $\lambda = \frac{2}{3} \lambda_f + \frac{1}{3} \lambda_s$ [4]. Нормировочный множитель вычислить аналогично предыдущему случаю, все остальное то же самое что в формулах выше:

$$I_0' = \lim_{n \rightarrow +\infty} I_{ML}' \int_0^{n(d_f + 2d_s)} \frac{dh}{(d_f + 2d_s) \exp\left[-\frac{(n(d_f + 2d_s) - h)}{\lambda}\right]} = 1$$

Используя все вышесказанное в настоящем исследовании были промоделированы зависимости Оже-сигнала самария от толщины пленки для структур Sm-Si(111), полученных при температурах 900 и 1140 К, и проведено их сравнение с экспериментом на рисунке 1. Как видно, они находятся в практически полном согласии с экспериментом. Из полученных результатов, в частности, следует, что при температуре 900 К аспектное отношение  $m/n \approx 1$ , а при 1140К  $m/n \approx 6$ . Таким образом увеличение температуры на 240 К приводит к увеличению аспектного отношения в 6 раз. Одной из возможных причин такой трансформации является то, что при переходе от 900 к 1140 К изменяется структура смачивающего слоя, в котором наблюдается фазовый переход  $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ \rightarrow (5 \times 1)$ , и что рассогласование решеток дисилицида самария и смачивающего слоя выше для высокотемпературной структуры. Несмотря на то, что в данном примере рассматривался анализ ЭОС – данных, предложенный формализм может быть использован и для других видов электронной спектроскопии, например, РФЭС.

Помимо этого, модель может быть использована не только для эллиптических островков, а для островков имеющих форму усеченных пирамид, многогранников и т.д.. Вообще говоря, можно использовать любую форму, задаваемую уравнением  $f(x, y, z) = 0$ . Можно даже использовать форму, которая не задается аналитически, но тогда задача будет решаться только численными методами. Такой взгляд на «островок» в этой модели может быть полезен для связывания спектроскопических методов исследования и АСМ и СТМ. Рельеф, который они дают на выходе может быть пересчитан в экранирующую функцию и изображение куска поверхности может быть пересчитано в спектроскопический сигнал, например в ЭОС.

Это может быть полезно для разных задач, но ограничимся здесь приведением одного примера. В пленках РЗМ известен эффект затягивания ЭОС сигнала при росте тонких пленок [5]. Этот эффект может быть обусловлен либо электронно-стимулированными переходами из-за облучения электронами, либо наличием глубоких дырок в структуре. Используя изложенную в прошлом абзаце идею, можно решить указанную проблему.

Продолжая и далее обобщение результатов, изложенных выше, отметим, что изложенный формализм можно использовать и для учета сложной внутренней структуры пленок посредством разделения задачу на подзадачи и вводя статистические множители, как это было показано ранее.

В заключении, изложенный в этой работе подход к анализу тонких пленок позволяет производить расчет величин сигналов методов электронной спектроскопии в случае островков произвольной формы  $f(x, y, z)$  и чисто теоретически с любой внутренней структурой и проводить моделирование зависимостей этих сигналов от покрытия, что дает возможность получать количественные данные о морфологии пленок, в частности, о форме островков.

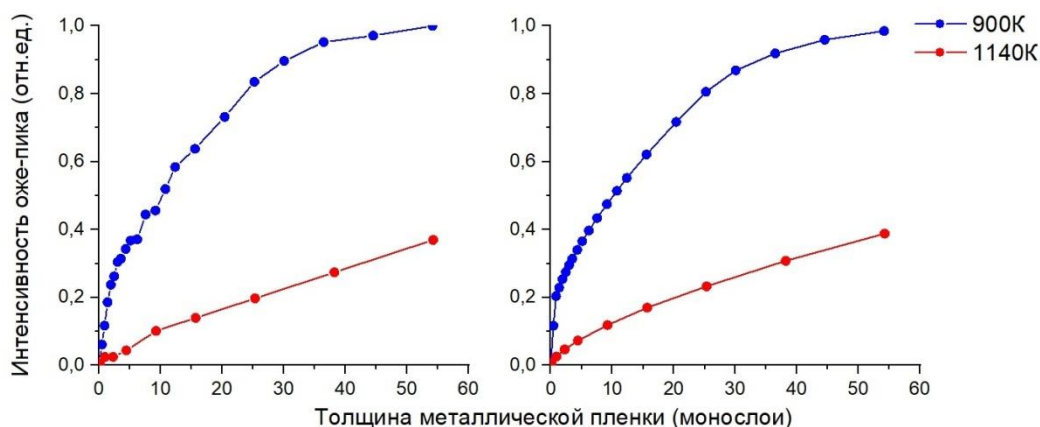


Рис.1. Экспериментальные (слева) и теоретические (справа) кривые

### Список литературы

1. Оура К, Лифшиц В.Г., Саранин А.А. «Введение в физику поверхности» Наука 2005
2. Т.В.Крачино, М.В.Кузьмин, М.В.Логинов, М.А.Митцев «Влияние температуры и степени покрытия на взаимодействие самария с поверхностью Si(111)» ФТТ 1998, т.40, вып. 10
3. Giorgio Rossi «d and f metal interface formation on silicon» Surface Science Reports 7 (1987) 1-101
4. В.Е.Ремеле, М.А.Митцев, М.В.Кузьмин «Количественный анализ пленочных структур с диффузной границей раздела, исследованных методом электронной Оже – спектроскопии» ФТТ 2023 т.65 вып.9
5. Д.В.Бутурович, М.В.Кузьмин, М.В.Логинов, М.А.Митцев «Особенности формирования пленок иттербия на поверхности Si(111) при комнатной температуре» ФТТ 2008 т.50 вып.1

## ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ГАЗОВЫЕ СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ СТАННАТА ЦИНКА, ДЕКОРИРОВАННОГО СЕРЕБРЯНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

РЫБИНА А.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В настоящее время разработка методов синтеза и исследование станната цинка представляет большой интерес для многих областей применения, включая газовую сенсористику. В работе был предложен метод синтеза газочувствительных слоев станната цинка, а также наночастиц серебра. Была разработана методика осаждения серебра на поверхность наночастиц станната цинка. Исследования отклика к парам органических растворителей показали, что модификация станната цинка серебром приводит к резкому увеличению чувствительности к парам изопропилового спирта.

*Ключевые слова:* газовые сенсоры, станнат цинка, наноструктура, наночастицы, благородные металлы

В связи с популяризацией охраны природы и актуальностью экологической проблемы в современном мире, использование газовых датчиков является необходимым. Наиболее распространенными и опасными газами, встречающимися в промышленности, являются углекислый газ, угарный газ, аммиак, сероводород, формальдегид, метан, ацетон. На сегодняшний день резистивные газовые сенсоры на основе смешанных полупроводниковых оксидов являются перспективными для научных исследований из-за их быстродействия, чувствительности, дешевизны, малых размеров. Станнат цинка - одна из возможных таких структур [1-5]. Преимуществами станната цинка являются высокая подвижность носителей заряда, высокая проводимость и стабильность.

Существует ряд способов получения станната цинка. Наиболее распространенные из них: гидротермальный синтез [6], золь-гель технология [7]. В данной работе синтез проводился методом осаждения в водном растворе [8]. В качестве прекурсоров были выбраны ацетат цинка и станнат натрия 3-водный. Полученный порошок был отожжен при трех температурах: 300<sup>0</sup>С, 500<sup>0</sup>С и 700<sup>0</sup>С. С помощью спектрофотометра была определена ширина оптическая запрещенной зоны структуры, которая составила около 3,2 эВ, что соответствует станнату цинка.

Полученные наночастицы наносились на сенсорные платформы со встречно-штыревыми электродами для исследования газочувствительных характеристик к парам летучих органических соединений (изопропиловый спирт, ацетон, этанол). Измерения проводились при рабочей температуре 250<sup>0</sup>С и концентрации газов 1000 ppm. Оказалось, что отклики структур, отожженных при различных температурах, отличаются. Так, структура, отожженная при 300<sup>0</sup>С, показала избирательность к изопропиловому спирту, при 500<sup>0</sup>С - к ацетону, при 700<sup>0</sup>С - отклик практически не наблюдался.

Для повышения чувствительности сенсоров было выполнено декорирование серебряными наночастицами [9]. Исследование их взаимодействия с газообразными аналитами показало, что отклик к парам изопропилового спирта при 250<sup>0</sup>С вырос в 20 раз. Тогда были еще проведены измерения при более низкой температуре, что также позволило увидеть хорошую чувствительность.

Таким образом, газовые сенсоры - один из методов контроля выбросов опасных газов, которые могут приводить к парниковому эффекту, разрушению озонового слоя и так далее. Тогда на сегодняшний день стоит задача создать датчики, которые могут обнаруживать очень малые концентрации таких газов. А декорирование серебряными наночастицами - один из методов повышения чувствительности газовых сенсоров. Это можно объяснить химической и электронной сенсibilизацией [10]. Кроме декорирования благородными металлами для улучшения характеристик датчиков можно применять оптическое облучение [11], создание гетеропереходов [12], модификацию поверхности и др.

### Список литературы

1. Налимова С.С., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А. Современное состояние исследований в области синтеза и применения станната цинка // Физика и химия стекла. – 2019. – Т. 45. – № 4. – С. 311-325.
2. Налимова С.С. и др. Исследование формирования слоев станната цинка методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 7. – С. 1132-1135.
3. Levkevich E.A. et al. Synthesis, investigation and gas sensitivity of zinc stannate layers // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. – 2020. – P. 984-986.
4. Налимова С.С. и др. Синтез и исследование газочувствительных наноструктур системы Zn-Sn-O // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – № 13. – С. 910-918.
5. Levkevich E.A. et al. Study of interaction between h2o molecules and ZTO-ZHS surface // AIP Conference Proceedings. 2020. 2280. P. 0018936.
6. Xu J., Jia X., Lou X., Shen J. One-step hydrothermal synthesis and gas sensing property of ZnSnO3 microparticles // Solid-State Electronics. – 2006. – Т. 50. - №3. – С. 504-507
7. Веневцев С. М., Гусеница Я. Н. Исследование тонких пленок ортостанната цинка, синтезированных золь-гель-технологией // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – №. 12. – С. 1119-1127.
8. Ge Q. et al. Phase evolution in preparing ZnSnO3 powders by precipitation method // Applied Physics A. – 2021. – Т. 127. – С. 1-8.
9. Nogami K. et al. Self-growth of silver tree-like fractal structures with different geometries // Applied Physics A. – 2022. – Т. 128. – №. 10. – С. 860.

10. Zhu L. Y. et al. Advances in noble metal-decorated metal oxide nanomaterials for chemiresistive gas sensors: overview //Nano-Micro Letters. – 2023. – Т. 15. – №. 1. – С. 89.

11. Suh J. M. et al. Light-activated gas sensing: a perspective of integration with micro-LEDs and plasmonic nanoparticles //Materials Advances. – 2021. – Т. 2. – №. 3. – С. 827-844.

12. Cheng P. et al. SnO<sub>2</sub>/ZnSnO<sub>3</sub> double-shelled hollow microspheres based high-performance acetone gas sensor //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2021. – Т. 332. – С. 129212.

## **МАСШТАБИРУЕМАЯ МЕТОДИКА СИНТЕЗА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ АДСОРБЦИОННЫХ ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ**

РЯБКО А.А.

*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН*

**Аннотация.** В работе представлена методика формирования наноструктурированных покрытий оксида цинка для применения в адсорбционных резистивных газовых сенсорах. Показано, что ультразвуковой спрей-пиролиз обеспечивает получение локальных затравочных центров для последующего формирования наностержней оксида цинка малого диаметре на поверхности зерен керамической подложки. Полученные наностержни демонстрируют высокую концентрацию поверхностных гидроксильных групп, указывающих на высокую концентрацию адсорбционных центров. Морфология сенсорного покрытия и высокая концентрация адсорбционных центров обеспечили высокий газоаналитический отклик на пары изопропилового спирта. Представленная методика пригодна для масштабирования технологии.

*Ключевые слова:* адсорбционный газовый сенсор, наноструктурированное покрытие, наностержни ZnO, гидротермальный синтез, спрей-пиролиз

### **Введение**

Принцип работы адсорбционных газовых сенсоров основан на изменении сопротивления материала при изменении толщины обедненного зарядами приповерхностного слоя материала в результате адсорбции и десорбции молекул газа, в заряженной из-за химических реакций форме [1]. Чувствительность сенсорного слоя будет определяться видом и концентрацией адсорбционных центров, размерами кристаллитов или нанокристаллов материала. Необходим такой размер нанокристаллов и морфология сенсорного слоя, чтобы обеспечивалась малая площадь контакта между нанокристаллами с формированием на границе обедненных областей потенциальных барьеров, а также обеспечивался доступ молекул газа ко всему объему материала сенсорного слоя.

В данной работе представлена методика формирования сенсорного слоя из наностержней оксида цинка. Которая основана на формировании затравочных центров методом ультразвукового спрей-пиролиза на поверхности керамической подложки и низкотемпературном гидротермальном синтезе наностержней ZnO с малым диаметром. Представленная методика формирования обеспечивает как высокую чувствительность сенсорного слоя, так и возможность масштабирования технологии.

### **Эксперимент**

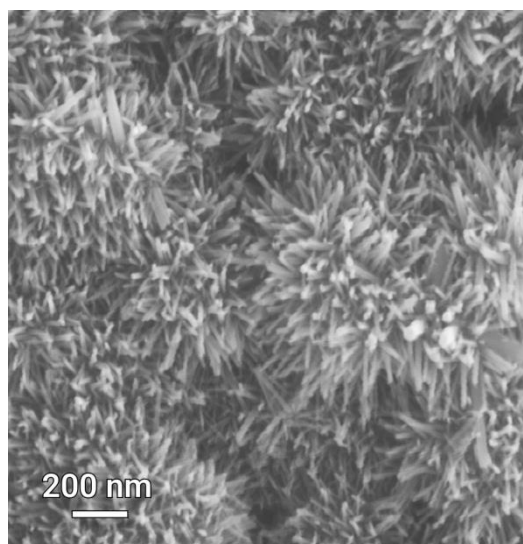
Формирование затравочных центров ZnO методом ультразвукового спрей-пиролиза проводилось с использованием водного раствора ацетата цинка 0.05 моль/литр и нагреве подложки до ~ 380 °С. Длительность спрей-пиролиза была подобрана таким образом, чтобы обеспечить получение локальных центров роста с эффективной толщиной

несплошного покрытия  $\sim 3$  нм [2]. В качестве прекурсоров для низкотемпературного гидротермального синтеза использовались нитрат цинка и гексаметилентетрамин эквимолярной концентрации 10 ммоль/литр с добавлением цетилтриметиламмония бромидом 1 ммоль/литр в качестве поверхностно-активного вещества. Температура синтеза поддерживалась равной 85 °С в течение 1 часа. Полученные сенсорные покрытия ZnO подвергались отжигу 500 °С в воздушной атмосфере в течение 5 минут.

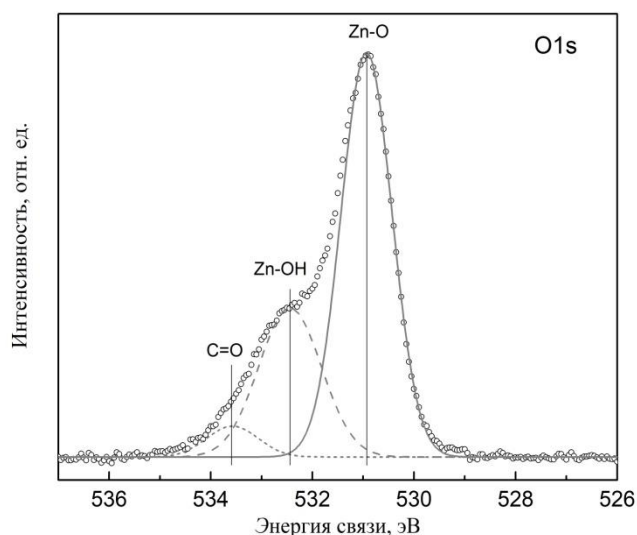
Морфология наноструктурированного покрытия определялась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Supra 25 (Carl Zeiss). Поверхность наностержней ZnO изучалась с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific Inc.) в условиях сверхвысокого вакуума ( $\sim 10^{-7}$  Па) при энергии возбуждающего излучения  $AlK\alpha = 1486$  эВ. Отклик сенсорного слоя на пары изопропилового измерялся при температуре  $\sim 150$  °С с помощью пикоамперметра Keithley 6485 (Tektronix Inc.).

### Результаты и обсуждение

Наноструктурированное покрытие ZnO (рис.1,а) представляет собой массивы из наностержней ZnO, которые находятся в контакте друг с другом, что обусловлено топологией поверхности керамической подложки. Представленная методика низкотемпературного гидротермального синтеза наностержней ZnO на затравочных центрах позволяет формировать на поверхности подложки вытянутые нанокристаллы ZnO, обладающие малым диаметром 10-20 нм, необходимым для высокого газоаналитического отклика.



а)



б)

Рис. 1. Характеризация сенсорного слоя из наностержней ZnO: а) РЭМ-микрофотография сенсорного слоя, б) РФЭС спектр основного уровня кислорода O1s приповерхностной области наностержней ZnO.

Атомное соотношение атомов кислорода к цинку в приповерхностной области нанокристаллов по данным РФЭС составляет  $\sim 0.72$ , что указывает на высокую концентрацию вакансий кислорода в кристаллической решетке. В спектре уровня кислорода O1s (рис.1, б) наблюдается основной пик кислорода в кристаллической решетке, а также отчетливый второй пик, который, согласно литературе, может быть



связан с кислородом в адсорбированных ОН-группах [3]. Таким образом, поверхностные дефекты в виде вакансии кислорода в приповерхностной области, вероятно, представляют собой адсорбционные центры, обеспечивающие высокую концентрацию поверхностных ОН-групп.

Значение газоаналитического отклика ( $R_{\text{air}}/R_{\text{gas}}$ ) сенсорного покрытия на пары изопропилового спирта составило  $\sim 15$  на концентрацию 1000 ppm и  $\sim 6$  на концентрацию 200 ppm. Следует ожидать, что полученное сенсорное покрытие из наностержней ZnO будет обладать достаточным откликом для практического применения при дальнейшем снижении концентраций газов-аналитов до значений единиц ppm.

### **Заключение**

Полученные в работе наностержни ZnO демонстрируют высокую концентрацию вакансий кислорода в приповерхностной области нанокристаллов и поверхностных ОН-групп, что указывает на высокую концентрацию адсорбционных центров. Морфология наноструктурированного сенсорного покрытия из массивов наностержней, сформированных на выступающих зернах керамической подложки с использованием локальных затравочных центров, обеспечивает пути протекания тока через пересечения наностержней ZnO малого диаметра и высокий газоаналитический отклик. Представленная методика с получением затравочных центров методом ультразвукового спрей-пиролиза обеспечивает высокую адгезию наностержней и возможность масштабирования технологии получения сенсорного покрытия ZnO.

### **Список литературы**

1. Рябко А. А., Бобков А. А., Налимова С. С., Максимов А. И., Левицкий В. С., Мошников В. А., Теруков, Е. И. Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – №. 5. – С. 758-764.
2. Рябко А. А. и др. Архитектоника покрытий из наностержней оксида цинка для адсорбционных газовых сенсоров // Журнал технической физики. – 2023. – Т. 93. – №. 10.
3. Kwoka, M.; Kulis-Kapuscinska, A.; Zappa, D.; Comini, E.; Szuber, J. Novel Insight on the Local Surface Properties of ZnO Nanowires // Nanotechnology 2020.- 31.-465705

## **ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ С ДЕТЕКТОРА WIDEPix**

САЙГУШЕВА А.В., БУРЧИК Н.Е.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная статья посвящена особенностям разработки программного модуля считывания данных с детектора WidePix. Данный детектор является приемником рентгеновского излучения, позволяющий получить не только рентгеновский снимок, но и спектр исследуемого объекта. Для использования детектора появилась необходимость разработки программного модуля для считывания данных, т.е. получение рентгеновского снимка. Также к данному программному модулю были добавлены возможности простой обработки полученных изображений (изменение контрастности с помощью гистограммы, получение негативного изображения и т.д.).

*Ключевые слова:* Полупроводниковый детектор, спектральный рентгеновский снимок, семейство чипов серии TimePix.

## Введение

Компьютерная томография является методом визуализации, который известен уже много лет. Этот метод дает дополнительную информацию об исследуемом объекте по сравнению с обычными рентгеновскими снимками. Для получения спектра используется полупроводниковый детектор рентгеновского излучения. Он работает на принципе образования электронно-дырочной пары в запрещенной зоне полупроводника под действием кванта упавшего рентгеновского излучения (рис.1). Количество полученных пар электронов и дырок пропорционально величине падающего излучения, поэтому можно определить и количество упавших квантов и их энергию. Это и позволяет определить спектр.

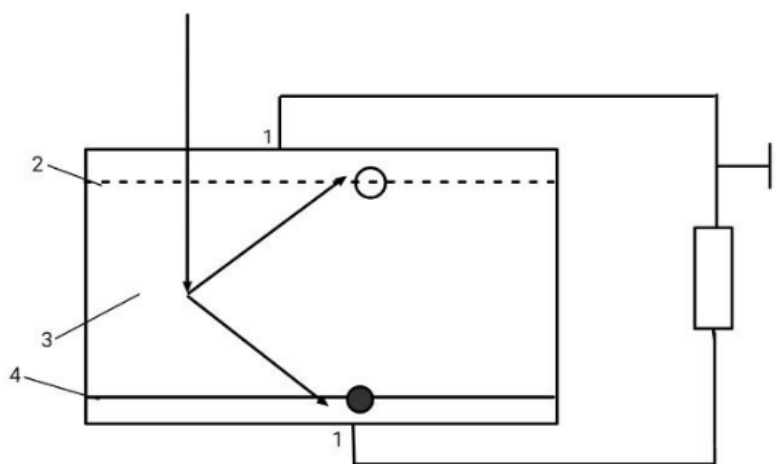


Рис. 1. Схема работы простейшего полупроводникового детектора

Для компьютерной томографии эффект одновременного получения спектра и изображения самого объекта был интересен много лет. Было получено несколько подходов решения этой задачи. Самым простым способом является использование двух последовательных сканирований обычным компьютерным томографом, используя разные настройки рентгеновской трубки. Также был предложен способ использования двух независимых блоков визуализации. Эти методы имеют свое применение, но количество недостатков в них велико. Тогда был предложен способ использования одного детектора с двумя чувствительными слоями. Передний слой обеспечивает изображение с низкой энергией, а нижний слой – изображение с высокой энергией. При дальнейшем развитии этого способа были получены детекторы с возможностью определения количества упавших фотонов с настройкой порогов в каждом пикселе или даже получения полного спектроскопического отклика.

## Строение и принцип работы серии чипов TimePix

Как и любой чип, данная серия имеет аналоговую и цифровую часть (рис.2). К аналоговой составляющей относится анод, который регистрирует входящие сигналы, предусилитель, предназначенный для сравнения сигнала с пороговым и его усиления, и дискриминатор, устанавливающий пороги. К цифровой части относят логическую систему, работающую по аналогии с асинхронным счетчиком. Ее состояние зависит от состояния входного затвора. Дальнейшие данные записываются в 8-битный конфигурационный регистр или же в 14-битный сдвиговый регистр. После переполнения одного из них система переходит к следующему пикселю.

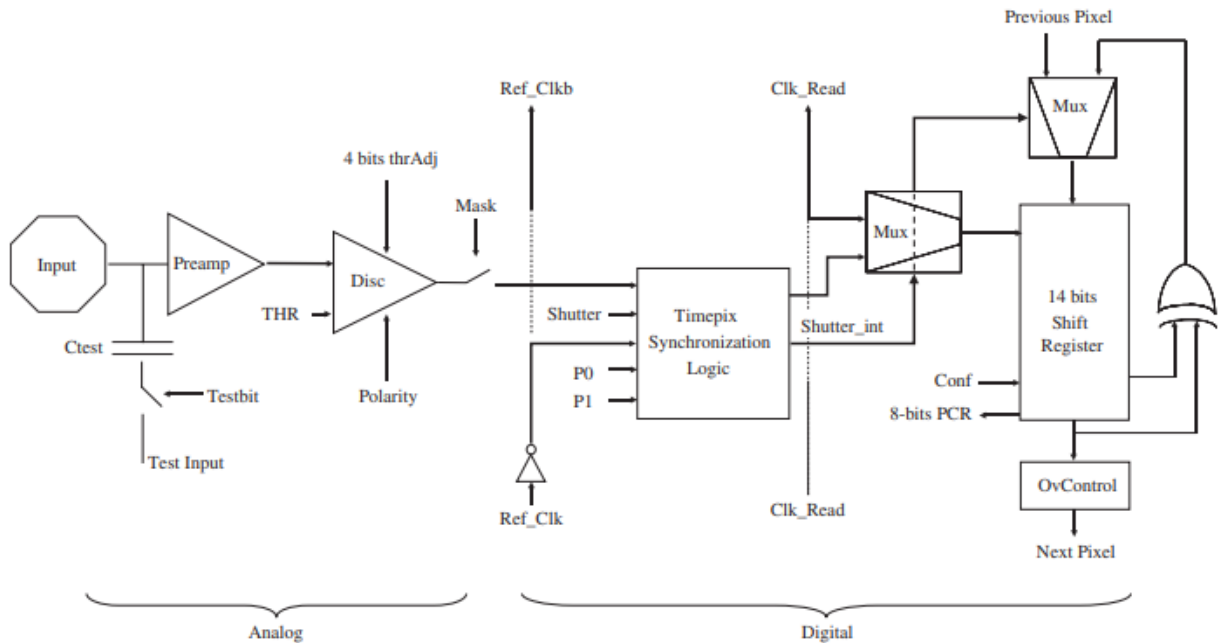
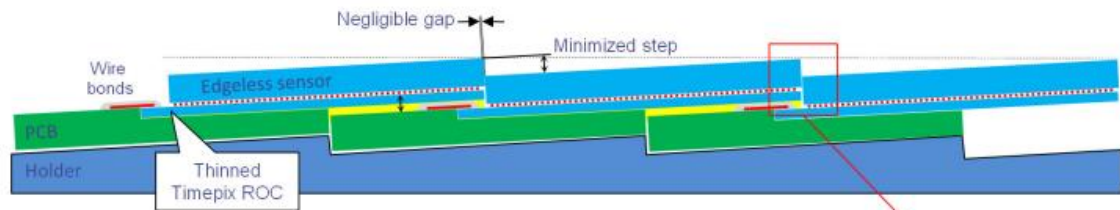


Рис. 2. Принципиальная схема чипа серии TimePix[3]

Строение чипа серии TimePix представляет собой слоистую структуру (рис.3). Пиксель представляет собой чувствительную матрицу, окруженную проводящими кольцами, которые уменьшают поверхностные токи. Благодаря этому такие чипы называют «бескрайними», что упрощает соединение нескольких таких пикселей. В детекторах, состоящих из таких чипов, пиксели укладываются в длинные ряды, и каждая нависающая часть предыдущего пикселя перекрывает начало следующего. Это создает чувствительную матрицу, в которой почти нет мест соединения с низкой чувствительностью. Главным недостатком такого чувствительного элемента является то, что он находится под наклоном, который нужно минимизировать. В основном толщина таких чувствительных элементов детектора составляет примерно 120 мкм, а угол наклона - 0.8 градусов. Такая система является независимой друг от друга и позволяет заменять любой из пикселей. Детекторы с такими чипами являются высокочувствительными и обладают высоким уровнем контраста, а при работе в непрерывном режиме полученные изображения почти не требуют коррекции.



Row prototype with 4 tiles:

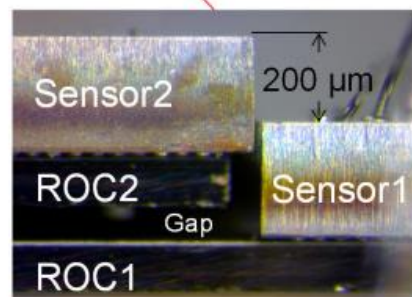


Рис. 3. Структура матрицы из чипов серии TimePix[2]

### Разработка программного модуля для детектора серии WidePix

Для создания программного модуля, предназначенного для считывания данных с детектора, используется язык программирования C++ и фреймворк Qt. Также используется динамическая библиотека «rxscore.dll», которая состоит из собственных функций данного детектора.

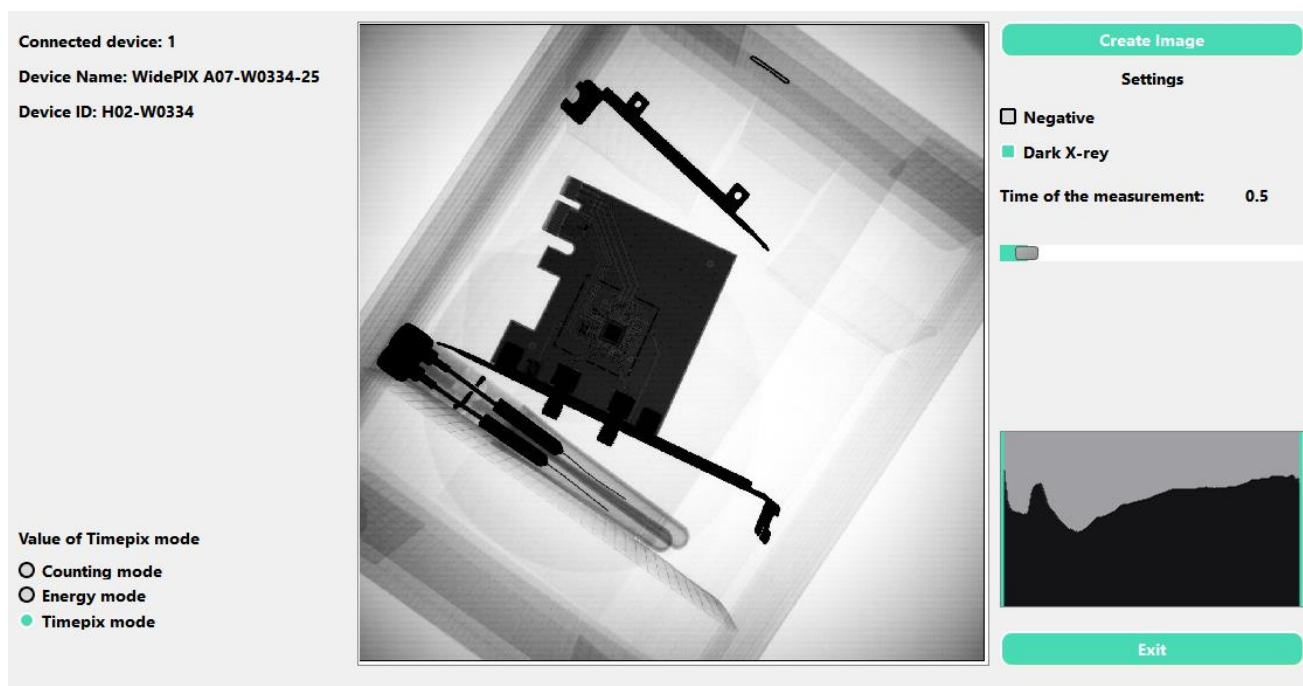


Рис. 4. Интерфейс разработанного программного модуля при тестировании

Используя основные функции этой библиотеки и встроенных библиотек Qt, получен программный модуль, который может получать данные, строить его гистограмму с возможностью регулировки контраста, имеет возможность простейшей обработки полученного изображения, а также установки режима работы самого детектора и времени экспозиции.

Интерфейс разработанного программного модуля представлен на рис.4.

### Заключение

С помощью детектора серии WidePix с чипом TimePix в компьютерной томографии есть возможность получения спектрального изображения, что может быть применено для формирования различных срезов и проекций. Разработанный программный модуль упрощает его применение и увеличивает возможности. Также, благодаря кроссплатформенности языков программирования C++ и Qt, полученный модуль может быть использован как отдельный на любой платформе или же встроен в другие программные обеспечения, созданные для работы с томографами.

### Список литературы

1. Е.А. Корнев, А.С. Лелюхин. Микроструктурные детекторы рентгеновских информационноизмерительных систем: учебное пособие. Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018.- 306 с.
2. J. Jakubek,a, M. Jakubek,a M. Platkevic,a P. Soukup,a D. Turecek,b V. Sykora,a and D. Vavrika - Large area pixel detector WIDEPIX with full area sensitivity composed of 100 Timepix assemblies with edgeless sensors

3. X. Llopart, R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos, W. Wong – Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements
4. Шлее М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. СПб: БХВ-Петербург, 2015. 928 с.
5. Qt Documentation //URL: <https://doc.qt.io/> (дата обращения 20.04.24)

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА ДЗЕТА-ПОТЕНЦИАЛ ЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

САТТОРОВ М.Ш.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*Хуачжунский университет науки и технологий (HUST), Ухань, КНР*

**Аннотация.** В статье рассматривается влияние среды на дзета потенциал наночастиц пористого кремния. Методом электрохимического травления были получены слои пористого кремния при низких и больших плотностях тока. Приведенные результаты обсуждаются с точки зрения их применения в биомедицине, а именно для лечения заболеваний головного мозга.

*Ключевые слова:* частицы, пористый кремний, дзета потенциал, медицина, неврологическое расстройство, ГЭБ

Одним из глобальных проблем здравоохранения является заболевания, связанные с неврологическими расстройствами (НР) такими как: Болезнь Альцгеймера (БА), болезнь Паркинсона (БП), болезнь Гентингтона (БГ) и рак головного мозга. Они входят в список трудноизлечимых болезней в всем мире [1,2]. Согласно [1], второй по частоте причиной смерти населения во всем мире являются заболевания, связанные с НР, 2019 году было зарегистрировано более 10 млн летальных исходов. Доклинические исследования привели к открытию различных высокоэффективных медикаментов (кандидатов) для лечения болезни НР. Однако их клиническое тестирование было затруднено в связи с наличием гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) (англ. BBB-blood brain barrier). ГЭБ – это высокоэффективный сосудистый барьер, разделяющий кровеносную и центральную нервную систему. Этот барьер находится на стенках капилляров и состоит из эндотелиальных клеток головного мозга и плотных соединений, периферических клеток и астроцитов, поэтому предотвращает попадание большинства вредоносных и токсичных компонентов крови в мозг. При попытке преодоления ГЭБ терапевтическими молекулами, были применены такие стратегии, как направленное ультразвуковое воздействие [3], имплантация резервуаров [4] и инъекции с усиленной конвекцией [5]. Как выяснилось, эти методики имеют ограничения в воспроизводимости, так как существует вероятность инфицирования как материалов, используемых в мозговых имплантах, так и инструментов, применяемых в процессе инвазивных хирургических вмешательств.

Другой многообещающей стратегией может быть использование частиц, которые обладают потенциалом проникновения через ГЭБ путем крепления специальных молекул на их поверхность. В качестве специальных молекул могут выступать трансферрин, аполипопротеины, лактоферрин и гликопротеины вируса бешенства. Все эти молекулы были изучены в качестве поверхностных лигандов, позволяющих пересекать ГЭБ из-за высоких уровней экспрессии их рецепторов [6]. Также эффективность переноса лекарственных веществ через ГЭБ зависит от размера носителя. Как правило, частицы меньшего размера имеют более высокую вероятность прохода через барьер, чем частицы

больших размеров [7]. В работе [8] приводятся данные, что частицы из сополимера молочной и гликолевой кислоты с диаметром 100 нм обладают высокой проникающей способностью через ГЭБ в связи с более длительной циркуляцией в крови по сравнению с частицами диаметром 800 нм.

Пористый кремний (pSi) — это универсальный материал, который демонстрирует значительный потенциал для решения многочисленных биомедицинских задач, благодаря своей сорбционной способности, большой площади поверхности, объему пор и концентрации, высокой стабильности, возможности формирования новых структур, модификации, биосовместимости и биоразлагаемости [9-12]. Частицы pSi рассматриваются в качестве платформ-носителей для адресной доставки лекарств (АДЛ) через гистогематические барьеры [13,14], включая доставку терапевтических агентов в ткани мозга для лечения болезни Альцгеймера [15-17]. При выборе технологических условий для получения pSi, важно учитывать геометрические параметры и свойства поверхности pSi. Это будет влиять в дальнейшем на многие характеристики, важные для применения в адресной доставке лекарств, такие как профили высвобождения лекарственных веществ, проникновение и способность к накоплению в определенных видах тканей, проникающую способность через различные барьеры в организме, время циркулирования в крови, биосовместимость, и другое [18-21]. Одним из важных параметров поверхности наночастицы является ее зарядовое состояние, а именно дзета-потенциал. Этот параметр играет важную роль в определении того, как поверхность pSi взаимодействует с введенными терапевтическими средствами, другими веществами, как материал достигает очага заболевания. В работе [13] измеряют дзета-потенциал комплексной частицы. Однако следует обратить внимание на то, что зарядовое состояние самой частицы, а также среда, в которой она находится, определяют её стабильность и, как следствие, могут повлиять на размер агрегатов таких частиц, а также на характер взаимодействия с другими веществами при создании на их основе сложных многокомпонентных платформ для АДЛ и тераностики. Поэтому целью данной работы является исследование влияния условий дисперсионной среды (воды и спирта) на заряд и размер частиц pSi для прохождения ГЭБ с использованием метода динамического рассеяния света.

Для получения наночастиц pSi, были использованы пластины Si двух типов: p- и r-типов проводимости. В первую очередь, методом электрохимического анодного травления были получены слои p-Si. Изменяемым параметром являлась плотность тока анодирования  $J_a$ . Подробная информация технологических условий процесса анодного травления приведена в таблице 1.

Таблица 1

№	Марка Si	Технологические условия			Среда получения наночастиц
		$J_a$ , мА/см <sup>2</sup>	t, мин	Электролит	
1.	КЭФ-4,5(111)	80	20	H <sub>2</sub> O, C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH, HF	Этанол
2.	КЭФ-4,5(111)		20		ddH <sub>2</sub> O
3.	КЭФ-4,5(111)	15	20		Этанол
4.	КДБ-10(111)		20		Этанол

Далее пластины из каждой серии были помещены в тару с дистиллированной водой, спиртом и подверглись ультразвуковому воздействию в УЗ-ванне (Сапфир, Россия) для получения частиц. После этого из каждой серии были подготовлены пробы объемом 1,5-2 мл. Затем из каждой пробы подготовили 2 вида образцов (супернатант и часть дисперсии с осадком) для измерения дзета-потенциала и размера.

Исследования дзета-потенциала и размеров полученных частиц проводились с помощью лабораторной установки Zetasizer Nano Ultra (Malvern Instruments Ltd, Великобритания). Результаты измерений приведены на рисунках 1 и 2.

Полученные данные продемонстрировали, что частицы, полученные при одних плотностях тока анодирования, но имеющие отличную дисперсную среду, могут иметь разные значения дзета-потенциала. Обнаружено, что образцы в спиртовой среде (sup n-SINP 80 и n-SINP 80) имели дзета-потенциал равный -20,6 мВ и -1,6 мВ. А последующее измерение размеров показало, что для этих образцов характерны размеры в диапазоне (360-1000 нм) и (568-2000 нм). Если сравнить частицы, находящиеся в H<sub>2</sub>O, можно заметить, что модульное значение дзета-потенциала у (Sup n-SINP 80; H<sub>2</sub>O) равна -33,5 мВ, а у образца (n-SINP 80; H<sub>2</sub>O) он равен -26,6 мВ. Результаты измерения размеров показывают, что для (Sup n-SINP 80; H<sub>2</sub>O) он варьируется от 51 до 80 нм, по сравнению с (n-SINP 80; H<sub>2</sub>O), который меняется в диапазоне 70-198 нм. Далее рассмотрим частицы (sup n-SINP 15) и (n-SINP 15) у которых дзета потенциал равен -10,9 мВ и -37,9 мВ. А результат измерения размеров показал, что частицы (sup n-SINP 15) имеют маленький диапазон распределения по размерам (80-170 нм), чем у (n-SINP 15), (146-1200 нм). В образцах, полученных из подложки дырочного типа проводимости, наблюдается что частицы (sup p-SINP 15) и (p-SINP 15) имеют дзета потенциал, равный -24,4 мВ, и -46,2 мВ и размер частиц приходится на диапазон (80-170 нм) и (146-420 нм).

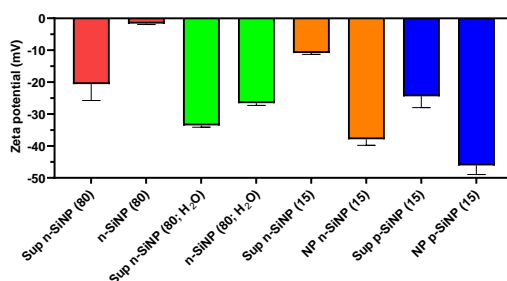


Рис. 1. Дзета-потенциал частиц pSi.

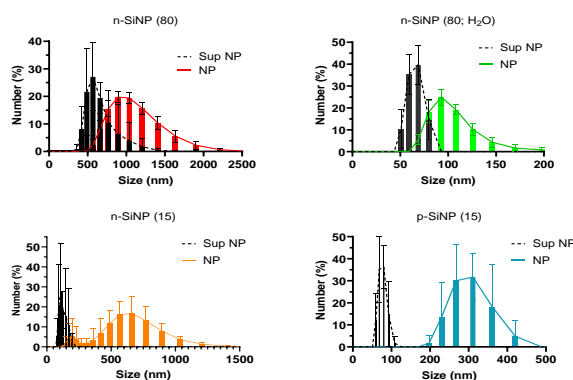


Рис. 2. Распределение размеров частиц pSi

Предполагается, что в процесс анодного травления Si, приводит к образованию энергетических кислотных центров Льюиса (рКа 14,2) и Бренстеда (рКа 5) на поверхности Si, которые легко взаимодействуют с кислородом и водородом в водной и спиртовой среде. С точки зрения прохождения через ГЭБ, наиболее предпочтительными являются частицы, имеющие размеры (1-100 нм) и обладающие дзета-потенциал меньше  $\pm 60$  мВ.

Таким образом, в результате работы были получены наночастицы pSi разного типа проводимости при разной Ja. Было установлено, что все наночастицы pSi имеют отрицательный дзета-потенциал, а образцы при низких Ja имеют большой потенциал. А также было показано, что в супернатанте содержатся частицы с размером 51-80 нм (Sup p-SINP 80; H<sub>2</sub>O) которые попадают в требуемый диапазон для разработки транспортных систем на основе pSi с целью прохождения ГЭБ.

### Список литературы

1. Ding C, Wu Y, Chen X, Chen Y, Wu Z, Lin Z, Kang D, Fang W and Chen F (2022) Global, regional, and national burden and attributable risk factors of neurological disorders: The Global Burden of Disease study 1990–2019. *Front. Public Health* 10:952161. doi: 10.3389/fpubh.2022.952161
2. Iqbal, K., Liu, F. & Gong, CX. Tau and neurodegenerative disease: the story so far. *Nat Rev Neurol* 12, 15–27 (2016). <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2015.225>
3. Omuro A, DeAngelis LM. Glioblastoma and other malignant gliomas: a clinical review. *JAMA*. 2013 Nov 6;310(17):1842-50. doi: 10.1001/jama.2013.280319.
4. Hersh DS, Wadajkar AS, Roberts N, Perez JG, Connolly NP, Frenkel V, Winkles JA, Woodworth GF, Kim AJ. Evolving Drug Delivery Strategies to Overcome the Blood Brain Barrier. *Curr Pharm Des*. 2016;22(9):1177-1193.
5. Furtado D, Björnalm M, Ayton S, Bush AI, Kempe K, Caruso F. Overcoming the Blood-Brain Barrier: The Role of Nanomaterials in Treating Neurological Diseases. *Adv Mater*. 2018 Nov;30(46):e1801362. doi: 10.1002/adma.201801362. Epub 2018 Jul 31.
6. Mi P, Cabral H, Kataoka K. Ligand-Installed Nanocarriers toward Precision Therapy. *Adv Mater*. 2020 Apr;32(13):e1902604. doi: 10.1002/adma.201902604.
7. Kulkarni SA, Feng SS. Effects of particle size and surface modification on cellular uptake and biodistribution of polymeric nanoparticles for drug delivery. *Pharm Res*. 2013 Oct;30(10):2512-22. doi: 10.1007/s11095-012-0958-3.
8. Nowak M, Brown TD, Graham A, Helgeson ME, Mitragotri S. Size, shape, and flexibility influence nanoparticle transport across brain endothelium under flow. *Bioeng Transl Med*. 2019 Dec 26;5(2):e10153.
9. Способ получения и пример лекарственной функционализации поверхности наночастиц пористого кремния // Спивак Ю.М., Беспалова К.А., Белорус А.О., Паневин А.А., Сомов П.А., Григорьева Н.Ю., Чистякова Л.В., Журавский С.Г., Мошников В.А. *Биотехносфера*. 2017. № 3 (51). С. 69-75.2;
10. Пористый кремний и его применение в биомедицине. Мошников В. А., Спивак Ю. М., Леньшин А.С. Гл. 4, с. 70-116 в моногр. «Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине». Под общ. ред. Акад. РАН В. Я. Шевченко, акад. РАН О. И. Киселева, проф. В. Н. Соколова. СПб: Химиздат, 2015. 367 с.
11. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху. Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин, С.Г. Журавский, В.А. Мошников, К. Беспалова, П.А. Сомов, Ю.М. Жуков, А.С. Комолов, Л.В. Чистякова, Н.Ю. Григорьева // *ЖТФ*, 2018. Т. 88. Вып. 9. С. 1394-1403.
12. Zhuravskii, S.G., Yukina, G.Y., Sukhorukova, E.G. et al. The Pattern of Granuloma Formation in the Liver of Rats as a Reflection of the Mechanism of Internalization of Submicron Silicon Particles. *Bull Exp Biol Med* 176, 399–402 (2024).
13. A Multifunctional Porous Silicon Nanocarrier for Glioblastoma Treatment. Luo M, Li Y, Peng B, White J, Mäkilä E, Tong WY, Jonathan Choi CH, Day B, Voelcker NH. *Mol Pharm*. 2023 Jan 2;20(1):545-560.
14. Influence of Surface Ligand Density and Particle Size on the Penetration of the Blood-Brain Barrier by Porous Silicon Nanoparticles. Zhang W, Zhu D, Tong Z, Peng B, Cheng X, Esser L, Voelcker NH. // *Pharmaceutics*. 2023 Sep 3;15(9):2271. doi: 10.3390/pharmaceutics15092271
15. Neuroprotective Effect of Nerve Growth Factor Loaded in Porous Silicon Nanostructures in an Alzheimer's Disease Model and Potential Delivery to the Brain. Zilony-Hanin N, Rosenberg M, Richman M, Yehuda R, Schori H, Motiei M, Rahimpour S, Groisman A, Segal E, Shefi O. // *Small*. 2019 Nov;15(45):e1904203.



16. Potential Alzheimer's disease therapeutic nano-platform: Discovery of amyloid-beta plaque disaggregating agent and brain-targeted delivery system using porous silicon nanoparticles. Kim J, Um H, Kim NH, Kim D. // Bioact Mater. 2023 Jan 9;24:497-506. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.01.006
17. Zhang, Liding & Cao, Kai & Xie, Jun & Liang, Xiaohan & Luo, Qingming & Luo, Haiming. (2023). A $\beta$ 42 and ROS Dual-targeted Multifunctional Nanocomposite for Combination Therapy of Alzheimer's Disease.
18. POTENTIAL ANTIVIRAL DRUG FOR THE TREATMENT OF SARSCOV- 2 BASED ON QUINACRINE AND POROUS SILICON Spivak Yu.M., Korolev D.V., Sattorov M.Sh., Shulmeister G.A., Skipin I.V., Istomina M.S., Moshnikov V.A. // Biomedical Journal of Scientific and Technical Research. 2022. Т. 42. № 2. С. 33513-33517
19. Cell penetrating peptide decorated magnetic porous silicon nanorods for glioblastoma therapy and imaging. Chaix A, Griveau A, Defforge T, Grimal V, Le Borgne B, Gautier G, Eyer J. // RSC Adv. 2022 Apr 14;12(19):11708-11714.
20. APPLICATION OF THE CAPILLARY CONDENSATION METHOD FOR POR-SI Khalugarova K., Sattorov M.S., Skipin I.V. // В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2022. 2022. С. 966-969
21. THE EFFECT OF ANODIZATION CURRENT DENSITY ON THE FUNCTIONALIZATION OF POROUS SILICON NANOPARTICLES WITH AN ANTIBIOTIC Sattorov M.S., Spivak Y.M., Gavazyuk N.O., Panov M.F. // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Conference PhysicA.SPb 2020" 2020. С. 012122

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР O<sub>2</sub>-Yb-Si(111) С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ ФОТОЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

СМИРНОВ И.А.<sup>1,2</sup>, МОНЯК А.А.<sup>2,3</sup>, КУЗЬМИН М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, высшая инженерно-физическая школа

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** В настоящей работе было исследовано температурное влияние на свойства плёночных структур O<sub>2</sub>-Yb-Si(111) с помощью РФЭС. Показано, что при адсорбции молекул кислорода на поверхности системы Yb-Si молекулы O<sub>2</sub> приобретают дипольные моменты и не диссоциируют, а их связи поляризуются. Это справедливо до 900 К при толщине пленки Yb равной 16 ML и до 1050 К при толщине пленки Yb – 8 ML. При повышении температуры выше приведенных происходит диссоциация молекул O<sub>2</sub>, атомы которых образуют связи с атомами кремния, диффундирующими из подложки.

*Ключевые слова:* поверхность, пленочные структуры, нанопленки, адсорбция, термостабильность, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 23-22-0005

В настоящее время объекты нанометровых размеров привлекают повышенный интерес благодаря уникальным электронным, магнитным, оптическим, электрическим и другим свойствам, а также возможности их модифицировать направленным образом [1,2]. В наших предыдущих исследованиях было показано, что в структурах вида «адсорбированный слой молекул-лигандов (O<sub>2</sub>, CO или NH<sub>3</sub>) - нанопленка иттербия - подложка Si(111)» наблюдается валентный переход Yb<sub>2+</sub> → Yb<sub>3+</sub>, который индуцирован адсорбированными молекулами и распространяется внутрь пленки на глубину не менее 10-16 моноатомных слоев (ML) (3.8-6.1 nm) [3-5]. Этот переход сопровождается изменением и других физикохимических свойств пленок, в частности, упрочнением связей между атомами иттербия, что в конечном счете приводит к пассивации границы

раздела Yb-Si и блокированию силицидообразования вплоть до температур  $\sim 1000$  К [6]. В ранних работах, однако, не было представлено прямых доказательств того, что при нагреве слои молекул кислорода на поверхности нанопленок иттербия не разлагаются на атомы. Кроме того, не было представлено данных, характеризующих адсорбционную конфигурацию этих молекул. Ясно, что без такой информации невозможно создание обобщенной модели указанных пленочных структур. Исходя из вышесказанного, в настоящей работе с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) исследовано влияние температуры на пленочные структуры O<sub>2</sub>-Yb-Si(111), и в частности, получены данные об адсорбционной конфигурации молекул кислорода на поверхности и максимальных температурах, при которых эти молекулы еще не разлагаются на атомы. Эксперименты проводились *in situ* в сверхвысоковакуумной системе с базовым давлением ниже  $1 \cdot 10^{-10}$  Торр. Основными экспериментальными методами были рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) и дифракция медленных электронов (ДМЭ). Исследования термической стабильности тонкопленочной системы кислород-иттербий-кремний проводились следующим образом: структуры, сформированные при комнатной температуре, нагревались до более высоких температур, регистрировались линии фотоэмиссии O 1s, Yb 4f и Si 2p и анализировалась их интенсивность в зависимости от температуры нагрева. На рисунке 1 представлены спектры 1s-уровня кислорода и результаты их разложения на компоненты для изучаемой структуры, полученные после нагрева при температурах 300, 600, 900 и 1050 К, с толщиной плёнки иттербия 8 ML. Спектр образован двумя пиками (O<sub>u</sub> и O<sub>d</sub>) с энергетическим сдвигом 1,1 эВ и равной интенсивностью. Эти пики обусловлены двумя разными атомами O с различным зарядовым состоянием (подтверждает это разная ширина пиков) и химическим окружением в молекуле кислорода. Возникновение такой адсорбционной системы возможно только в том случае, если один конец молекулы кислорода ориентирован к поверхности плёнки, образуя ковалентные связи, а другой – в вакуум. Исходя из данных исследования и более ранних измерений работы выхода системы кислород-иттербий-кремний атомы O, которые образуют связь с атомами Yb, считаются более отрицательно заряженными, чем атомы, не образующие связи с поверхностью. В результате первый из этих атомов отнесен к пику O<sub>d</sub>, а второй-к пику O<sub>u</sub>. Полученные данные указывают на то, что при адсорбции молекул кислорода на поверхности системы Yb-Si молекулы O<sub>2</sub> приобретают дипольные моменты и не диссоциируют, а их связи поляризуются.

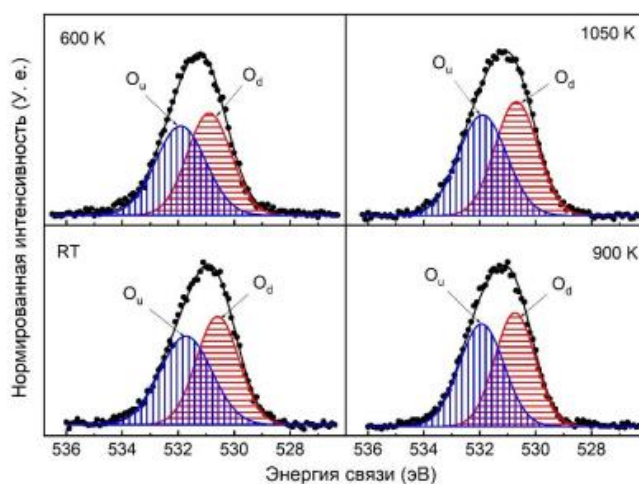


Рис. 1. Разложение экспериментальных O 1s-спектров для системы кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки Yb 8 ML, полученные в диапазоне температур от комнатной до 1050 К

Также в рамках работы была исследована системы кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки Yb 16 ML. 1s-спектры кислорода и результаты их разложения для такого же диапазона температур представлены на рисунке 2. Спектры имеют схожий вид в интервале температур от комнатной до 900К. Это означает, что выводы о конфигурации адсорбции молекул кислорода в структуре кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки Yb 8 ML справедливы и для структур, где плёнка иттербия 16 ML. Однако имеются и различия. Так, энергетическое расщепление для пиков  $O_d$  и  $O_u$  составляет  $\sim 0,6$  эВ. Это значение почти в два раза меньше, чем аналогичное значение для структуры с толщиной плёнки Yb 8 ML. Такое различие, по-видимому, связано с тем, что поляризация связей адсорбированных молекул кислорода уменьшается с увеличением толщины плёнки иттербия (размерный эффект). Кроме того, изменяется ширина пиков  $O_d$  и  $O_u$ :  $O_d$  становятся более узкими, а  $O_u$  – более широкими. Главное же отличие можно заметить тогда, когда температура нагрева повышается до 1050 К.

Качественное изменение происходит в 1s-спектре кислорода. Вместо компоненты  $O_d$  появляется компонента  $O_2$ , смещённая на  $\sim 0,25$  эВ в область меньших энергий, а вместо компоненты  $O_u$  –  $O_1$ , смещённая  $\sim 0,15$  эВ в область больших энергий. При этом отношение интенсивностей компонент  $O_1$  и  $O_2$  также изменяется и составляет примерно 10:1. Такая трансформация свидетельствует о диссоциации молекул  $O_2$  в структуре кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки Yb 16 ML при 1050К. Одним из следствий разрушения молекулярного слоя кислорода может быть также диффузия атомов кремния из подложки в иттербиевую наноплёнку. В этом случае интенсивность фотоэлектронного пика кремния должна увеличиться, а иттербия – уменьшиться. Это согласуется с данными, полученными в результате построения температурных зависимостей для интенсивности фотоэлектронных линий кислорода, иттербия и кремния (рис. 3).

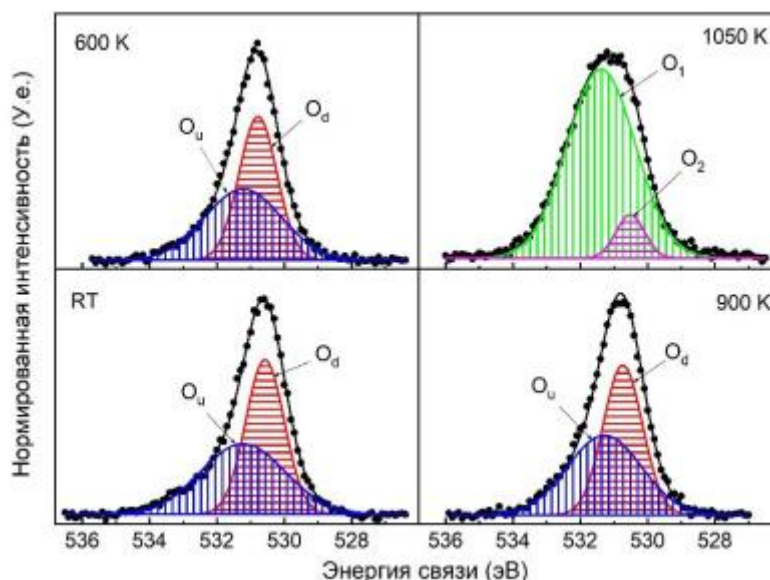


Рис. 2. Разложение экспериментальных  $O_2$  1s-спектров для системы кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки Yb 16 ML, полученные в диапазоне температур от комнатной до 1050 К

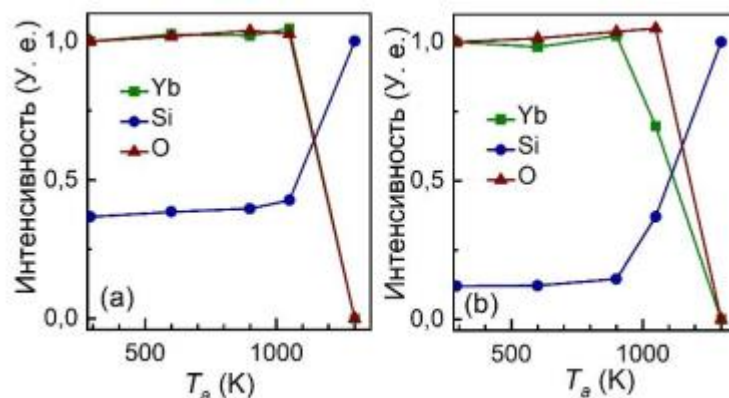


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности фотоэлектронных линий компонент для структур кислород-иттербий-кремний при различной толщине плёнки Yb: 8 ML – (a), 16 ML – (b)

Спектры 2p-уровня кремния для структур кислород-иттербий-кремний с толщиной плёнки иттербия 16 ML (рис. 4), полученные при разных температурах, помогают объяснить, что происходит с продуктами разложения молекул кислорода в системе. На зависимости видно, что при нагревании структуры до 1050 K в спектре помимо единственного максимума с энергией  $\sim 99,2$  эВ (атомы кремниевой подложки) появляется особенность в виде небольшого пологого пика (выделен пунктиром) с энергией 101,7-103,7 эВ. Такое энергетическое положение указывает на то, что атомы кремния образуют связи с атомами кислорода.

На рисунке 5 предложена модель, качественно объясняющая высокую термическую стабильность слоёв  $O_2$  на поверхности наноплёнок Yb, а также позволяющая объяснить зависимости их термостабильности от толщины плёнок. На ней цифрами обозначены 1 – поверхность, 2,3 – положительно и отрицательно заряженные обкладки двойного слоя соответственно, 4,5 – атомы молекулы кислорода, на которых локализован отрицательный и положительный заряды соответственно.

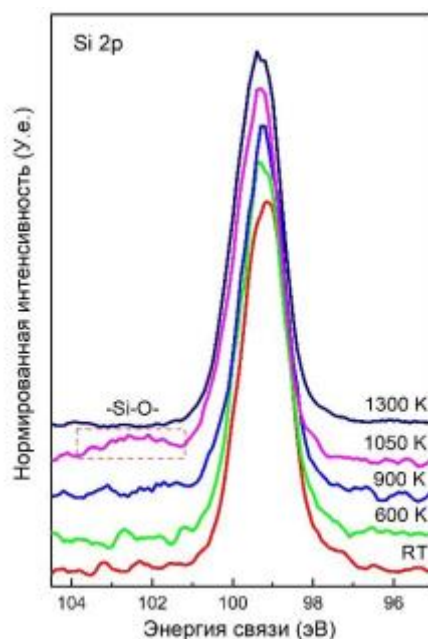


Рис. 4. Спектры 2p-уровня кремния для структур кислород-иттербий-кремний, полученных в диапазоне температур от комнатной до 1050 K. Пунктирной линией выделена особенность, обусловленная атомами Si, которые образуют связи с атомами O

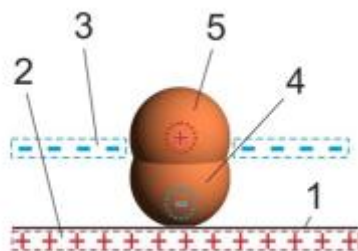


Рис. 5. Схематическое представление двойного слоя и адсорбированной молекулы кислорода на поверхности нанопленки иттербия

### Список литературы

1. T.A. Saleh. Surface science of adsorbents and nanoadsorbents. In: Interface Science and Technology. Elsevier, Academic Press (London). Vol. 34. (2022). 324 p.
2. Synthesis and modification of nanostructured thin films. Ed. I.N. Mihailescu. MDPI (Basel). (2020). 261 p.
3. Д.В. Бутурович, М.В. Кузьмин, М.В. Логинов, М.А. Митцев. ФТТ 57, 9, 1821 (2015).
4. Д.В. Бутурович, М.В. Кузьмин, М.А. Митцев. Письма в ЖТФ 38, 21, 22 (2012).
5. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев. ФТТ 64, 7, 874 (2022).
6. М.В. Кузьмин, М.А. Митцев, Н.М. Блаженков. ФТТ 59, 8, 1612 (2017). 7. D.A. Shirley. Phys. Rev. B 5, 4709 (1972).

## ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА НИЗКОВОЛЬТНЫХ КАТОДОВ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕРОДНЫМ СЛОЕМ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С ВЫСОКИМ АСПЕКТНЫМ СООТНОШЕНИЕМ

СМИРНОВА С.П.<sup>1</sup>, ДАВЫДОВ С.Н.<sup>1</sup>, СМЕРДОВ Р.С.<sup>2</sup>, ИСТОМИНА М.С.<sup>3</sup>, КОНДРАТЬЕВ В.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

<sup>3</sup>Институт экспериментальной медицины ФГБУ «НМИЦ им В.А. Алмазова»

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт

**Аннотация.** Доклад содержит результаты измерения эмиссионных характеристик прототипов низковольтных автоэлектронных эмиттеров с узким энергетическим спектром. Проведенный с использованием графических структур типа Фаулера-Нордгейма анализ свидетельствует о наличии полевого механизма эмиссии электронов. Рассчитанные значения высоты эффективного потенциального барьера для выхода электронов с поверхности материала составляют менее 0,3 эВ. Полученные данные указывают на целесообразность проведения дальнейших исследований с целью совершенствования стабильности и ресурса прототипов для последующего применения в качестве источников электронов в системах электронно-зондового анализа.

*Ключевые слова:* низковольтная эмиссия, энергетический спектр, композиционный катод, углеродные наноструктуры, спектроскопия характеристических потерь

Известно, что некоторые углеродные материалы, включая пирографит, нанопористый углерод, нанографит и плоские графеноподобные структуры, способны демонстрировать автоэлектронную эмиссию в электрических полях на два-три порядка ниже, чем характерные при классической автоэлектронной эмиссии из металлов и полупроводников. Низковольтная эмиссия (НПЭ) – это термин, обычно используемый для обозначения этого явления [1, 2, 3]. Было обнаружено, что эффект НПЭ наиболее выражен на материалах, сходных по структуре с графеном. Процесс изготовления таких структур влияет на их



физические характеристики, которые могут различаться и имеют решающее значение для реализации прототипов низковольтных катодов [4].

Автоэлектронные эмиттеры являются базой ряда систем вакуумной нано- и микроэлектроники: активных элементов интегральных схем, низковольтных автоэмиссионных дисплеев, устройств СВЧ [4], а также компонентов систем электронно-зондовой диагностики [5], в частности метода характеристических потерь энергии электронов (EELS) [6]. Для метода EELS остро стоит проблема баланса между необходимостью снижения тянущего напряжения с целью сохранения разрешающей способности на требуемом уровне и увеличением плотности эмиссионного тока для проведения исследований в области основных потерь, и применение новых материалов с низкой работой выхода для изготовления катодов решает эту проблему, так как при этом можно получить значительные плотности токов в макроскопических полях примерно в 100 раз меньше чем те, при которых обычно наблюдается холодная полевая эмиссия.

В рамках настоящей работы выполнено исследование эмиссионных характеристик прототипов катодов, выполненных на базе композиционных структур (матрица из пористого кремния, покрытая углеродными коллоидными квантовыми точками).

На рисунке 1 а) представлен РЭМ-снимок столбиков кремния, полученных с помощью криогенного плазмохимического травления пластины КДБ-12, кристаллографическая ориентация (001), длина столбиков около 12 мкм, поперечное сечение у основания около 1,5 мкм. Рисунок 1 б) содержит РЭМ-снимок столбиков кремния после осаждения на них ККТ углерода с использованием в качестве прекурсора L-lysine [7, 8].

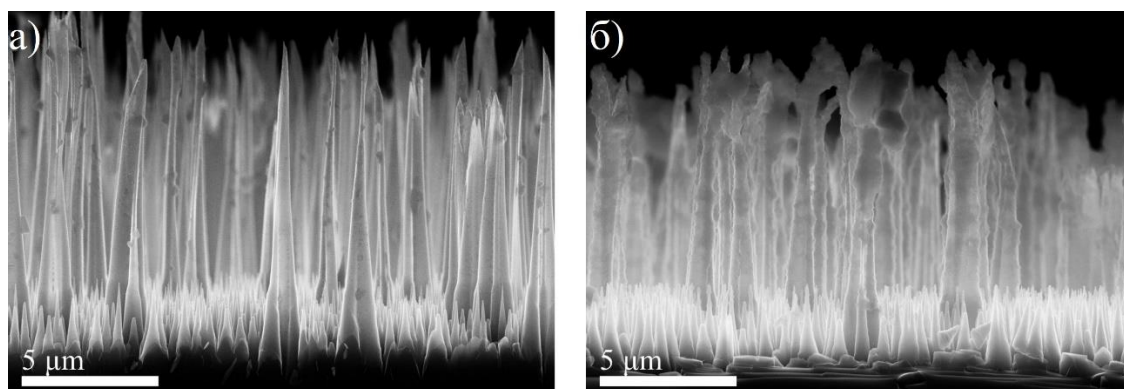


Рис. 1. а) РЭМ острой кремниевой матрицы, б) РЭМ образца, покрытого углеродным слоем

Работа проводилась с помощью вакуумной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 2. Значение абсолютного энергетического разрешения  $\Delta E$  варьируется в диапазоне 20 мэВ  $<\Delta E < 300$  мэВ. Минимальный ток эмиссии, при котором возможен энергетический анализ, составляет примерно 0,1 нА [9].

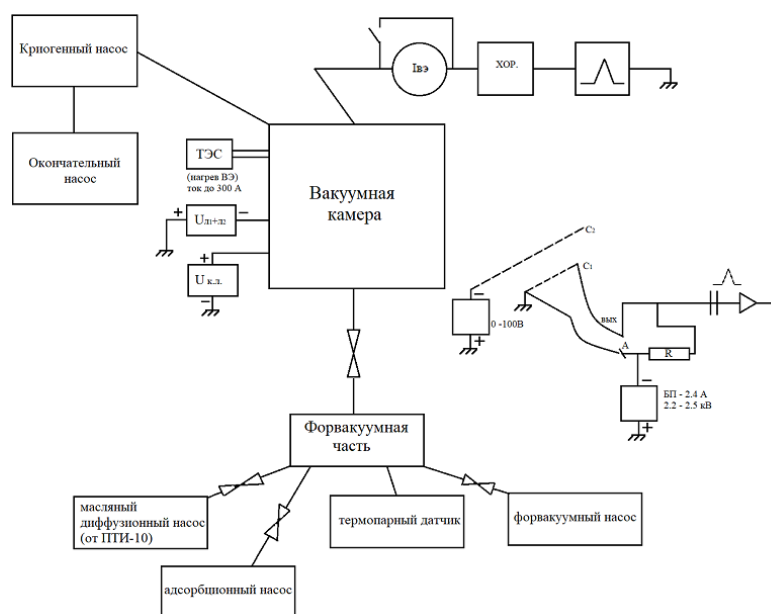


Рис. 2. Блок-схема вакуумной установки

Без нагревания образца была получена вольт-амперная характеристика, показанная на рисунке 3 а). Некоторые параметры эксперимента указаны на рисунке. При напряжении между электродами, равном 3180 В, произошел скачок тока до 307 нА, поэтому пришлось резко снизить напряжение во избежание «сгорания» образца. При значении напряжения, равном 3280 В, произошел скачок тока до 100 нА. Скачки тока не отражены на характеристике, чтобы избежать потери наглядности.

Выполненный анализ показывает, что сила тока экспоненциально зависит от напряжения между электродами, что указывает на существование полевого механизма эмиссии.

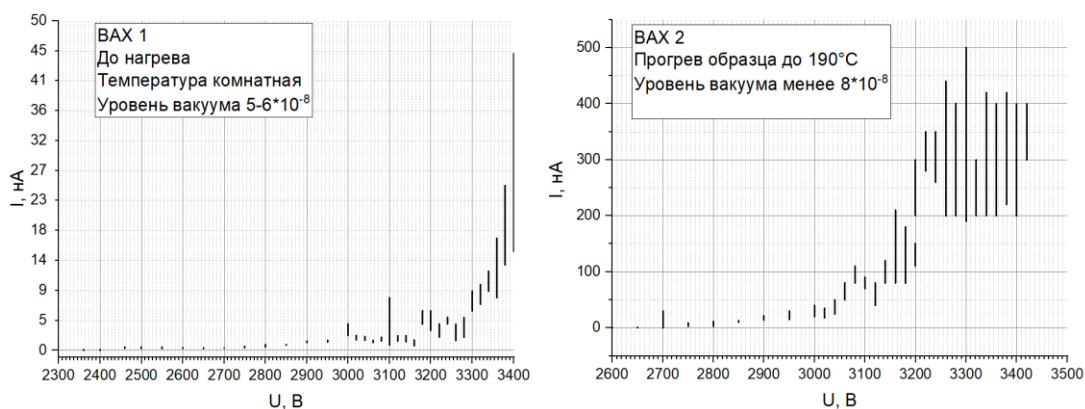


Рис. 3 а) ВАХ образца до нагревания, б) ВАХ образца после прогрева

Затем образец нагревался в течение 30 минут до температуры около 200°C. Полученная после этого вольтамперная характеристика представлена на рисунке 3 б). При значении напряжения 2700 В наблюдался скачок тока до 30 нА. При значении напряжения 3200 В измерение было повторено спустя 3 минуты. Диапазон значений тока возрос в 2 раза – от 110-150 нА, до 200-300 нА. При значении напряжения 3420 В произошел скачок тока до значения 2 мкА. После проведения измерений уровень вакуума снизился до  $9 \cdot 10^{-8}$  Торр.

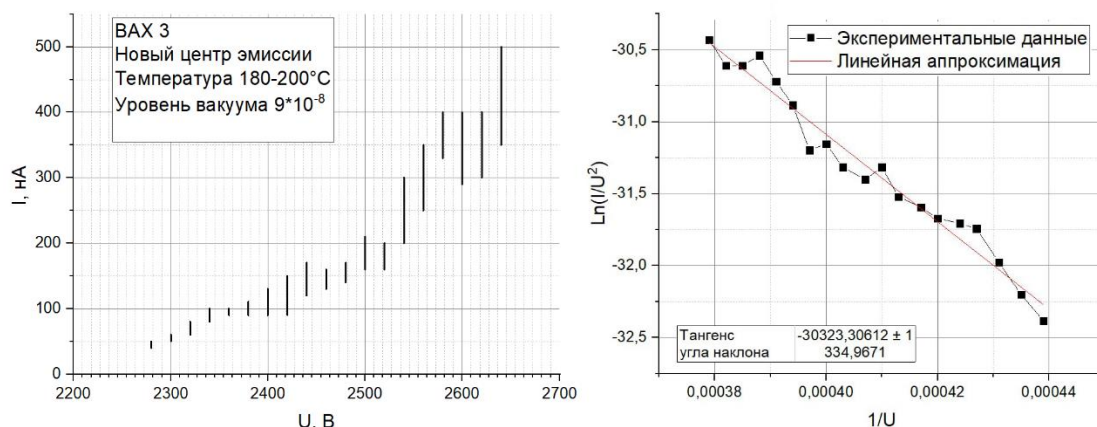


Рис. 4 а) VAX открывшегося эмиссионного центра, б) результат линеаризации эмиссионной характеристики по методу Фаулера-Нордгейма

По полученным VAX, представленным на рисунке 3 можно сделать вывод, что для предварительно нагретого образца при неизменном значении напряжения эмиссионные токи больше как по абсолютному значению, так и с точки зрения амплитуды колебаний.

После скачка тока до 2мкА было выдвинуто предположение о том, что внутри образца активировался эмиссионный центр. На рисунке 4 а) представлена его вольтамперная характеристика. В начале измерений уровень вакуума составлял около  $8 \cdot 10^{-8}$  Торр, в конце –  $9,5 \cdot 10^{-8}$  Торр. По измеренной VAX эмиссионного центра был получен график (рисунок 4 б)) в координатах Фаулера-Нордгейма.

Эффективная работа выхода материала была получена с помощью выражения, которое с учетом поправочных коэффициентов может быть представлено в виде (1):

$$S_M = \left( -6.44 \cdot 10^9 \varphi_{eff}^{\frac{3}{2}} \cdot d \right) / \gamma, \quad (1)$$

где  $d = 0.6$  мм – межэлектродный зазор, м,  $\gamma \approx 20$  – коэффициент локального усиления поля,  $S_M \approx -30323.30612$  – наклон графика в координатах Фаулера-Нордгейма,  $\varphi_{eff}$  – эффективная работа выхода электронов, эВ. Под эффективной работой выхода понимать энергию, которую необходимо затратить для переноса электрона с уровня Ферми, так что в итоге электрон должен оказаться достаточно близко к поверхности по сравнению с ее поперечным размером. Уровень энергии электронов в этом конечном положении в отсутствие внешнего поля называется вакуумным уровнем [4]. Рассчитанная эффективная работа выхода материала  $\varphi_{eff} = 0.29$  эВ. Для сравнения, в работе [6], где рассматривались эмиссионные катоды на основе пористого кремния, функционализированные допированным серебром углеродными структурами на базе фуллерена  $C_{60}$  [10], минимальное рассчитанное значение высоты потенциального барьера для электронов составляет 0.31 эВ.

Таким образом, в рамках настоящего исследования были получены вольтамперные характеристики образца из модифицированного углеродным слоем пористого кремния с высоким аспектным соотношением. Материал способен эмитировать электроны, причём именно по механизму индуцированной полем эмиссии. Низкое значение эффективного потенциального барьера для выхода электронов с поверхности свидетельствует о перспективе его применения в качестве анодного при создании систем термоэмиссионного преобразования нового поколения [11], а также в роли источника



электронов для приборов диагностики на базе эффекта характеристических потерь энергии электронов в случае проведения исследований состава нановыделений на границах различных фаз (например, карбидных), которые требуют повышенной плотности тока электронов в зонде.

Следует также отметить необходимость проведения процедуры активации эмиссионных центров образца при повышенной температуре. Предварительно прогретый до 200°C образец эмитирует гораздо интенсивнее, а его эмиссионные токи – выше при тех же значениях приложенного напряжения.

### Список литературы

1. Forbes R.G. Low-macroscopic-field electron emission from carbon films and other electrically nanostructured heterogeneous materials: hypotheses about emission mechanism // *Solid-State Electronics*. 2001. Vol. 45, № 6. P. 779–808.
2. Bizyaev I. et al. Low-Field Electron Emission Capability of Thin Films on Flat Silicon Substrates: Experiments with Mo and General Model for Refractory Metals and Carbon // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, № 12. P. 3350.
3. Forbes R.G. et al. The pre-exponential voltage-exponent as a sensitive test parameter for field emission theories // *R. Soc. open sci.* 2021. Vol. 8, № 3. P. rsos.201986, 201986.
4. Возняковский А. П. и др. Низкопороговая полевая электронная эмиссия из двумерных углеродных структур // *Письма в Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45. – №. 9. – С. 46-49.
5. Lemeshko P.S., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A. Possibilities of Multiphoton Microscopy in Semiconductor Nanomaterials Research // *Nanotechnol Russia*. 2023. Vol. 18, № S1. P. S203–S209.
6. Smerdov R., Mustafaev A. Novel low-macroscopic-field emission cathodes for electron probe spectroscopy systems // *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Т. 134. – №. 11.
7. Istomina M.S. et al. Microwave Preparation of Cqds and their Incorporation into Porous Silicon Matrices // *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2022. P. 955–957.
8. Kondratev V.M. et al. Si Nanowire-Based Schottky Sensors for Selective Sensing of NH<sub>3</sub> and HCl via Impedance Spectroscopy // *ACS Appl. Nano Mater.* 2023. Vol. 6, № 13. P. 11513–11523.
9. Davydov S. N. et al. Electron spectrometer for studying field-induced emission from nanostructured objects // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2016. Vol. 2, № 4. P. 306–315.
10. Yu. Spivak, V. Moshnikov, R. Smerdov, R.F. patent RU 2796247 C1 (19 August 2022) Способ получения функционализированной наноструктуры на основе пористого кремния
11. Mustafaev A.S. et al. Nano-size effects in graphite/graphene structure exposed to cesium vapor // *Journal of Applied Physics*. 2018. Vol. 124, № 12. P. 123304.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗМЕРОВ НАНОСТЕРЖНЕЙ

### ГИДРОКСИАПАТИТА МЕТОДОМ СОРБЦИОННОГО АНАЛИЗА

СУХОРУЧЕНКОВ К.В., ПОЛЯКОВ Д.Д.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе проводится оценка размеров наностержней гидроксиапатита с использованием сорбционного анализа и метода химического осаждения с микроволновым излучением. Полученные данные позволяют оценить размеры частиц на различных этапах синтеза.

*Ключевые слова:* гидроксиапатит, анализ размеров наностержней, сорбционный анализ

### Введение

Гидроксиапатит кальция (ГАП) представляет собой мезопористый материал, широко применяемый в области костной инженерии и стоматологии. Способы изготовления

керамики на основе ГАП постоянно совершенствуются. Помимо требований к порошкам для биокерамики, критической является воспроизводимость параметров пористой структуры в процессе синтеза. Развитие эффективных методов анализа этих характеристик необходимо. В контексте стоматологии ключевым фактором является соответствие размеров частиц синтетического гидроксиапатита и дентина.

### Определение размеров наностержней

Цель исследования заключалась в определении размеров наностержней гидроксиапатита с различным аспектным отношением с использованием метода сорбционного анализа. В рамках работы была рассмотрена серия порошков гидроксиапатита, полученных методом химического осаждения с применением микроволнового излучения. Исходные данные для анализа и определения размеров наностержней были получены из исследований процессов адсорбции и десорбции инертных газов на пористых адсорбентах, проведенных с использованием прибора Сорби от ЗАО "МЕТА" (Новосибирск, Россия) [1–3].

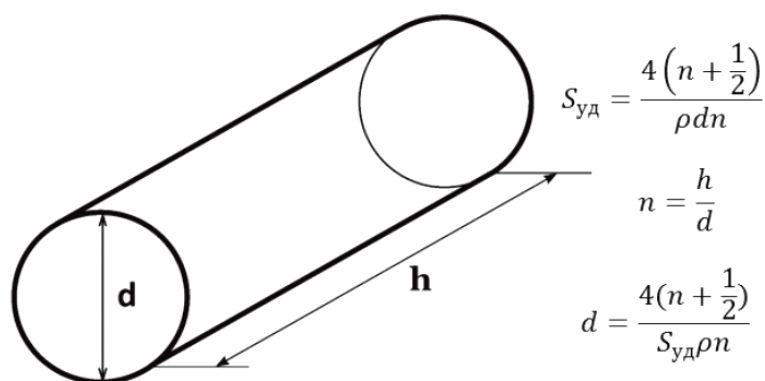


Рис. 1. Оценка диаметров и высоты наностержня при заданной плотности гидроксиапатита

Размеры наностержней гидроксиапатита определялись на основе данных о плотности и удельной поверхности (рис. 1), а соотношение "длина/диаметр" анализировалось на основе изображений, полученных методом сканирующей электронной микроскопии.

Для синтеза порошков гидроксиапатита использовались нитрат кальция и ортофосфорная кислота в рамках метода гидрохимического осаждения с применением микроволнового излучения [4, 5]. Растворы прекурсоров перемешивались на магнитной мешалке со скоростью 500 оборотов в минуту. Для поддержания pH на уровне 10 добавляли 0,75 мл аммиачной воды, что вызывало выпадение белого осадка в виде хлопьев. Затем растворы подвергались термообработке в микроволновой печи мощностью 700 Вт до удаления жидкости. Воздействие микроволн с частотой 2,45 ГГц производилось в нормальной атмосфере, а полученные порошки отжигались в муфельной печи.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что сорбционный анализ размеров наночастиц при исследовании наностержней гидроксиапатита позволяет оценить диаметр формирующихся частиц на различных этапах синтеза. Преимущества этого метода включают возможность оценки для большого количества материала в одном эксперименте и высокую скорость исследования. Учитывая возможную неоднородность размеров наностержней даже в пределах одного образца, для более точного определения

размеров может быть рекомендовано использование стандартных методов локального исследования поверхности, таких как сканирующая электронная или зондовая микроскопия.

Также представляет интерес продолжить развитие методов моделирования процессов адсорбции инертных газов на биосовместимых материалах на основе гидроксипатита [6-10]. При этом, существующая программа [9] позволяет проводить определение удельной поверхности, объема пор и распределение пор по размерам в пористых наноматериалах. Исходными данными для работы программы являются экспериментальные результаты исследования процессов адсорбции и десорбции инертных газов на различных адсорбентах. Программа позволяет строить изотермы адсорбции-десорбции по введенным экспериментальным данным, а также гистограмму распределения пор по размерам в исследуемом наноматериале.

В разрабатываемом виртуальном приборе предусмотрена возможность выбора газа-адсорбата и вывода на экран его основных характеристик, используемых для расчета параметров пористой структуры.

После усовершенствования программа предполагается к внедрению в учебный процесс.

Таким образом, в отличие от других методов исследования структурных характеристик образцов, адсорбционные методы анализа [10] имеют ряд преимуществ: возможность исследования большого объема материала в один прием (в отличие от локальных методов, где анализируются отдельные участки образца и результаты исследования усредняются), возможность исследования материалов с большой шероховатостью, где другие методы анализа поверхности неприменимы или нежелательны. Полученные результаты позволяют оценить близость исследуемого материала к характеристикам дентина и костной ткани человека по таким параметрам как наличие или отсутствие микропор, которые могут привести к уменьшению прочности получаемого биоматериала, размер частиц порошка, удельная поверхность, распределение пор по размерам.

Авторы выражают благодарность доценту Мараевой Е.В. за ценную консультативную помощь и руководящие замечания.

### Список литературы

1. Мошников В.А., Александрова О.А. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование: Лабораторный практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.
2. Gracheva I.E. et al. Nanostructured materials obtained under conditions of hierarchical self-assembly and modified by derivative forms of fullerenes // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2012. V. 358, №2. P. 433–439.
3. Леньшин А.С., Мараева Е.В. Исследование удельной поверхности перспективных пористых материалов и наноструктур методом тепловой десорбции азота // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ*. 2011. Т. 6. С. 9–16.
4. Radha G., Balakumar S., Venkatesan B., Vellaichamy E. Evaluation of hemocompatibility and in vitro immersion on microwave-assisted hydroxyapatite–alumina nanocomposites // *Materials Science and Engineering: C*. 2015. V. 50. P. 143–150.
5. Khalugarova K.N., Maraeva E.V., Zaikina A.V., Matveev V.A., Moshnikov V.A. Influence of heating time and microwave radiation power on the microstructure and phase composition of calcium-phosphorus compounds during formation // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. V. 1697 №1. P. 012050
6. Maraeva E.V., Bobkov A.A., Moshnikov V.A., Averin I.A. THERMAL DESORPTION OF INERT GASES IN METAL-OXIDE NANOMATERIALS // *Smart Nanocomposites*. 2017. Т. 8. № 1. С. 73-77.
7. Мараева Е.В., Мошников В.А. ТЕПЛОВАЯ ДЕСОРБЦИЯ АЗОТА КАК СПОСОБ КОНТРОЛЯ РАЗМЕРОВ НАНОЧАСТИЦ В КОМПОЗИЦИЯХ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА И ГИДРОКСИПАТИТА // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2021. № 13. С. 294-299.

8. Мараева Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТА // Вестник Новгородского государственного университета. 2021. № 4 (125). С. 47-51.
9. Мараева Е.В., Сомов П.А., Максимов А.И., Мошников В.А. ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ НАНОМАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛОЙ ДЕСОРБЦИИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ "AR-N-POROUS" // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017617787, 12.07.2017. Заявка № 2017610899 от 03.02.2017.
10. Мараева Е.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДСОРБЦИИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА БИОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИАПАТИТОВ // В сборнике: Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Под редакцией А.Н. Яковлева. 2017. С. 364-365.

## **ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ ЯЧЕЙСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВДОХНОВЛЕННЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ**

СЫСОЕВ Е.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*Институт химии силикатов им. И.В. Гребениčkова РАН*

**Аннотация.** В работе изучено акустическое поведение звукопоглощающих материалов с морфологией кристаллических структур углерода. Для численной оценки коэффициента звукопоглощения использовалась 8-параметрическая модель Джонсона-Шампу-Алларда-Лафаржа-Прайда (JCALP). Экспериментальное исследование проводилось на импедансной трубе по методу двухмикрофонной передаточной функции. Показано, что результаты, полученные с использованием модели JCALP хорошо согласуются с экспериментальными данными для всех образцов. Рассматриваемый метод проектирования периодических структур с использованием «кристалломорфного дизайна» демонстрирует высокий потенциал для создания многофункциональных материалов.

*Ключевые слова:* ячейстые структуры, кристалломорфный дизайн, модель JCALP, 3D печать

### **Введение**

Многие звукопоглощающие материалы, например, пенопласты, обладают хорошими акустическими и теплоизолирующими характеристиками, однако демонстрируют низкие механические свойства, что ограничивает их применение в многофункциональных задачах [1]. Кроме того, неуправляемый процесс вспенивания материала затрудняет контроль микроструктуры и, следовательно, звукопоглощения.

В настоящее время для создания функциональных звукопоглощающих материалов с управляемыми акустическими свойствами используют трижды периодические ячейстые материалы, геометрию которых легко оптимизировать для достижения требуемых характеристик [2]. В основном, ячейстые материалы для задач шумоподавления представляют решетчатую конструкцию с использованием стоек, пластин, или оболочек. Благодаря развитию аддитивных технологий возможно изготовление звукопоглотителей из разных материалов со сложной геометрией пор. Для многофункционального применения наибольший интерес представляют материалы с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ), поскольку эти структуры обладают повышенными механическими характеристиками благодаря своей седловидной форме с нулевой средней кривизной [3]. Хотя ТППМЭ являются математически определенными объектами, их подобие может быть обнаружено в природе, например, в форме электронной плотности кристаллов [4].

С развитием вычислительной техники появились эффективные методы расчета и генерации электронной плотности, что позволило проектировать ячеистые структуры с геометрией кристаллических веществ – «Кристалломорфный дизайн» [5]. Поскольку число известных ТППМЭ весьма ограничено, разработанная методика представляет эффективный инструмент для поиска новых геометрий, подобных ТППМЭ, и создания функциональных ячеистых материалов на их основе.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование коэффициента звукопоглощения образцов с кристалломорфной геометрией, подобной ТППМЭ.

### Материалы и методы

#### Моделирование элементарной ячейки

В соответствии с методом, предложенным в работах [5,6], для создания звукопоглощающих ячеистых материалов использовались распределения электронной плотности углеродных кристаллических структур разной пространственной группы. Расчет электронной плотности, основанный на преобразованиях Фурье структурных факторов, проводился в программе VESTA. На рисунке 1 представлены элементарные кристаллические ячейки вместе с рассчитанной изоэлектронной поверхностью, подобной геометрии ТППМЭ (1а) Primitive и (1б) Gyroid. С использованием полученных поверхностей были смоделированы ячейки жесткого каркаса методом заполнения одного лабиринтного пространства материалом (2а) и методом утолщения поверхности (2б). Элементарные ячейки каркаса использовались для проектирования САД моделей образцов, а ячейки воздушной поры (3а,б), получаемые вычитанием объема каркаса из куба, для численной оценки звукопоглощения.

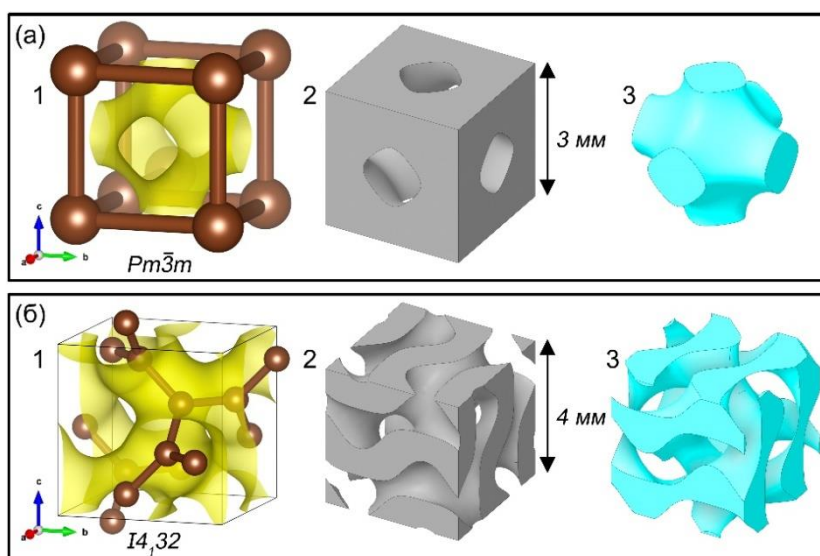


Рис. 1. 1 – элементарная ячейка и рассчитанная изоэлектронная поверхность для структуры углерода с пространственной группой (а)  $Pm\bar{3}m$  и (б)  $I4_132$ ; 2 – жесткий каркас; 3 – воздушная пора

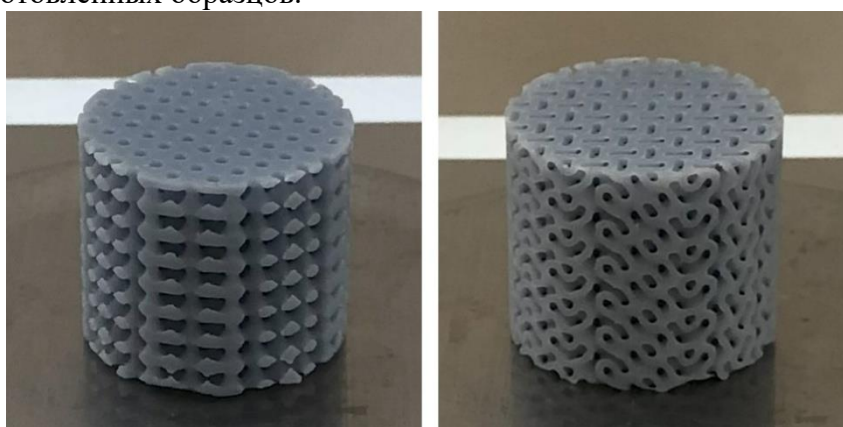
#### Численная оценка звукопоглощения

Поскольку кристалломорфные структуры (каркас) не участвуют в диссипации звуковой энергии из-за высоких упругих свойств материала 3D печати, для прогнозирования коэффициента звукопоглощения периодической ячейки пористой среды использовалась 8-параметрическая модель неподвижного скелета – модель Джонсона-Шампу-Алларда-

Лафаржа-Прайда (JCALP). Данная полуфеноменологическая модель описывает акустическое поведение материала с произвольной формой пор на основе морфологии структуры [7].

#### *Изготовление опытных образцов*

С использованием спроектированных элементарных ячеек каркаса (рис. 1) были разработаны цилиндрические модели высотой 25 мм и диаметром 29 мм для изготовления опытных образцов и экспериментального исследования нормального коэффициента звукопоглощения. Для точного воспроизведения геометрии моделей была выбрана LCD (liquid crystal display) технология 3D печати, основанная на УФ-излучении ЖК-матрицы фотополимерной смеси. Образцы после печати очищались от остатков в спирте с использованием вихревой ванны и сжатого воздуха, а также подвергались дополнительной засветке для дополимеризации. На рисунке 2 представлены фотографии аддитивно изготовленных образцов.



*Рис. 2. Напечатанные образцы с геометрией, подобной Primitive (слева) и Gyroid (справа), для экспериментального исследования звукопоглощения*

#### *Экспериментальное исследование звукопоглощения образцов*

Нормальный коэффициент звукопоглощения определялся по методике ГОСТ 16297-80 [8] на изготовленных образцах в частотном диапазоне от 500 до 6400 Гц на основе усреднения трех результатов измерений. В качестве испытательного оборудования использовалась импедансная труба типа 4206 производства «Brüel & Kjaer».

#### **Результаты и их обсуждение**

На рисунке 3 показана зависимость расчетного и измеренного коэффициента звукопоглощения от частоты волны. Можно заметить, что численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для всех образцов. Это также доказывает, что метод неподвижного скелета позволяет достоверно оценить звукопоглощение аддитивно изготовленных образцов, а выбранная модель JCALP в полной мере учитывает все морфологические особенности кристалломорфных структур. Наблюдаются небольшие отклонения расчетных коэффициентов на частоте максимального поглощения: у образца Gyroid -7%, у образца Primitive -5%.

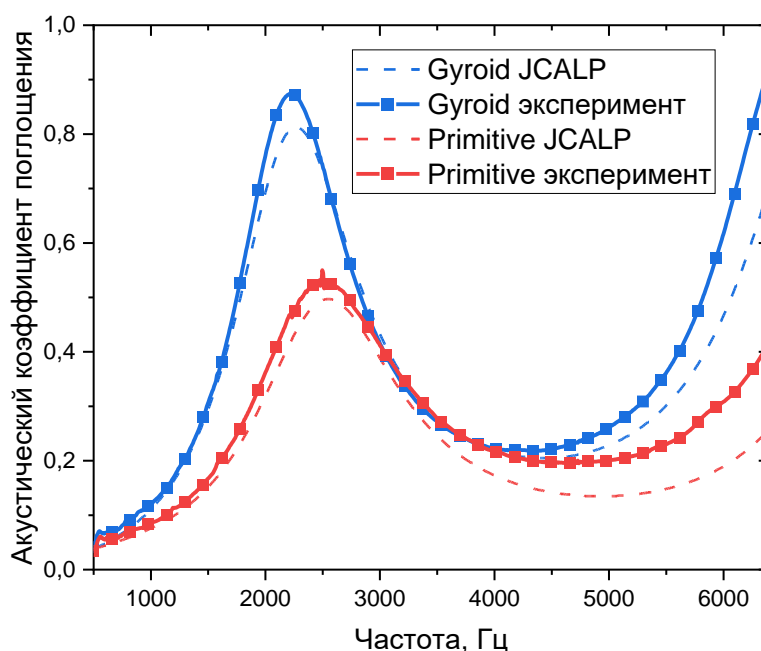


Рис. 3. Сравнение теоретического и экспериментального коэффициента поглощения.

Найденные отклонения могут быть связаны с неточностью расчета акустических параметров модели JCALP, а также с возможными внутренними дефектами (фотополимерные включения и шероховатость), образующихся в процессе 3D печати.

В результате проделанной работы было показано, что использование периодических ячеистых материалов с равномерным распределением воздушных пор, обеспечивает предсказуемые характеристики. Рассматриваемый метод проектирования структур с использованием «кристалломорфного дизайна» демонстрирует высокий потенциал для создания многофункциональных материалов. Варьируя толщину материала, геометрию и размер элементарной ячейки можно получать узко- или широкополосные фильтры с требуемыми полосами пропускания/поглощения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-73-10171).

### Список литературы

1. Tao Y., Ren M., Zhang H., Peijs T. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies - A review. *Appl. Mater. Today.*, 24, 101141 (2021).
2. Li X., Chua J.W., Yu X., Li Z., Zhao M., Wang Z., Zhai W. 3D-Printed Lattice Structures for Sound Absorption: Current Progress, Mechanisms and Models, Structural-Property Relationships, and Future Outlook. *Adv. Sci.*, 11, 4, 2305232 (2024).
3. Shevchenko V.Y., Balabanov S.V., Sychev M.M., Karimova L. Prediction of Cellular Structure Mechanical Properties with the Geometry of Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). *ACS Omega*, 8, 30, 26895–26905 (2023).
4. von Schnering H.G., Nesper R. How Nature Adapts Chemical Structures to Curved Surfaces. *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.*, 26, 11, 1059–1080 (1987).
5. Arsent'ev, M.Y., Balabanov, S.V., Sychev, M.M., Dolgin D.S. Crystalline Design of Cellular Materials. *Glass Phys Chem*, 46, 6, 657–660 (2020).
6. Arsent'ev M.Yu., Sysyoev E.I., Makogon A.I., Balabanov S.V., Sychev M.M., Hammouri M.H., Moshnikov V.A. High-Throughput Screening of 3D-Printed Architected Materials Inspired by Crystal Lattices: Procedure, Challenges, and Mechanical Properties. *ACS Omega*, 8, 28, 24865–24874 (2023).
7. Zieliński T.G., Venegas R., Perrot C., Cervenka M., Chevillotte F., Attenborough K. Benchmarks for microstructure-based modelling of sound absorbing rigid-frame porous media. *J. Sound Vib.*, 483, 115441 (2020).



## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ КРАЕВОГО И ПРИМЕСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ АЛМАЗА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ

Телицын Н.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе исследовался набор монокристаллических алмазных пластин с различной степенью легирования бором. Исследование включало в себя измерение и анализ спектров пропускания образцов в УФ области спектра, а также снятие FTIR-спектров и оценку концентрации бора по ним. Обсуждаются замеченные модификации краевого и примесного поглощения алмаза в зависимости от степени легирования бором. Рассчитанные по графикам ИК-поглощения концентрации составили: для сильнолегированного образца –  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , для среднелегированного образца –  $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , для слаболегированного образца –  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

*Ключевые слова:* алмаз, FTIR-спектроскопия, фундаментальный край поглощения, оптическое пропускание, концентрация примеси бора

Алмаз издавна славится своими уникальными свойствами: рекордным показателем твердости, чрезвычайной химической инертностью (при комнатной температуре на него не действует ни одна из сильных кислот или щелочей), огромной теплопроводностью 20 Вт/см·К, что в 3 раза выше, чем у золота, и это только малая часть преимуществ данного материала. Также алмаз обладает чрезвычайно широким окном оптического пропускания от фундаментального края вплоть до радиоволн, что позволяет применять его в разных диапазонах электромагнитных волн. Область двухфононного поглощения имеется только в среднем ИК диапазоне [1].

В настоящее время технологи добились огромных успехов в синтезе монокристаллического алмаза методом HPHT (высоких давлений и высоких температур), в процессе которого углерод из графита переходит в алмаз под действием высоких давлений порядка 5 ГПа и при температурах около 1500 °С. Помимо качественных нелегированных образцов, которые в основном используют в ювелирном деле, с помощью данной технологии есть возможность получать полупроводниковые алмазы, легированные бором (примесь *p*-типа). Комбинация получаемых при легировании бором полупроводниковых свойств алмаза и набора его уникальных электрофизических, химических, механических и оптических свойств открывают целый ряд возможностей применения данного материала в микро- и нанoeлектронике, фотонике и в квантовых технологиях.

В данной работе исследовался набор монокристаллических алмазных пластин, выращенных методом HPHT, который включал в себя как нелегированные, так и легированные образцы. Для оптических методов анализа, используемых в нашем исследовании, нанесение металлических контактов не требовалось.

Нелегированный алмаз является диэлектриком с шириной запрещенной зоны 5,45 эВ, что соответствует фундаментальному краю оптического поглощения на длине волны 220-225 нм. В чистых, совершенных алмазах и в оптическом поглощении, и в люминесценции ярко проявляется свободный экситон. Он имеет энергию связи 80 мэВ и наблюдается даже



при комнатной температуре, что открывает перспективу создания экситонных излучателей – диодов и лазеров [2].

В ходе выполнения данной работы на спектрофотометре СФ-56 были измерены спектры пропускания для двух образцов алмаза: нелегированного и сильнолегированного (рис 1) в диапазоне длин волн от 190 до 350 нм. Как и ожидалось, для нелегированного образца наблюдается полное поглощение до 220 нм, после чего коэффициент пропускания растет с увеличением длины волны. Для сильнолегированного образца наблюдается рост коэффициента пропускания  $T$  при длинах волн от 220 нм до 240 нм, а затем при дальнейшем увеличении  $\lambda$  наблюдается уменьшение  $T$ , что, вероятнее всего, связано с возникновением переходов с участием примесных состояний бора.

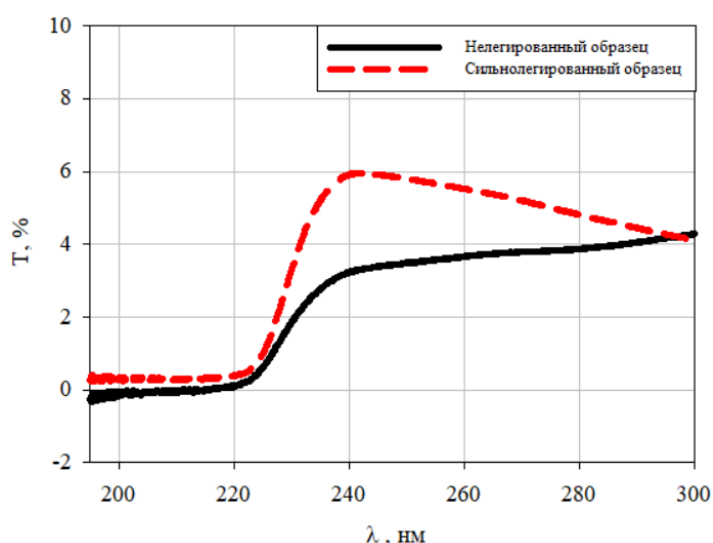


Рис. 1. Измеренный спектр оптического пропускания двух образцов алмаза в УФ области спектра

Метод FTIR-спектроскопии активно используется для изучения примесного состава натуральных и синтетических алмазов [3]. Для определения концентрации некомпенсированного бора в алмазе в спектре ИК-поглощения рассматриваются три характеристических пика (полосы) с разными волновыми числами: 2802, 2454 и 1290  $\text{см}^{-1}$ . Первые два пика, называемые первичным и вторичным, образуются в результате переходов дырок из основного состояния акцепторного центра  $1s$  в возбужденные состояния  $2p$  и соответствуют энергиям переходов 347 мэВ и 304 мэВ (рис. 2). Третичный пик при 1290  $\text{см}^{-1}$  возникает в спектрах сильнолегированных образцов, так как из-за возникновения примесной полосы исчезают узкие отклики бора в области собственного трехфононного поглощения. Учитывая, что с ростом концентрации бора характер спектра существенно изменяется, необходимо в каждом исследуемом спектре выбирать пик, наиболее точно определяющий концентрацию примеси.

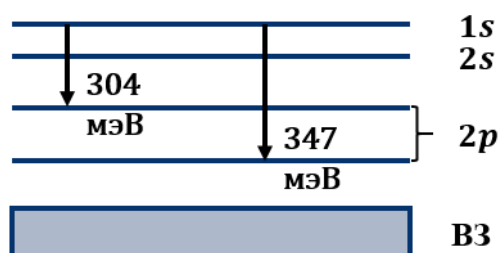


Рис. 2. Упрощенная схема энергетических уровней бора в алмазе

Методика определения концентрации по спектрам FTIR была подробно описана в статье Ховелла в 2019 году [4]. При обработке полученных нами спектров был использован тот же алгоритм, что и в цитируемой статье (рис. 3):

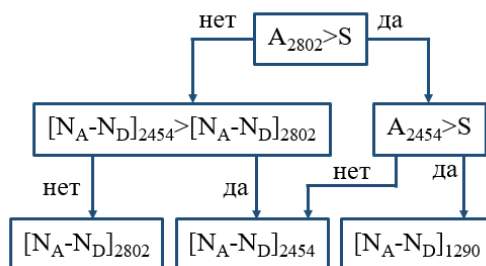


Рис. 3. Алгоритм расчета концентрации некомпенсированной примеси бора из [4]

Оценка концентрации некомпенсированной примеси бора проводилась по следующим формулам:

$$[N_A - N_D](ppm) = (0,0350 \pm 0,0028) \cdot H_{2802} (\text{см}^{-1}),$$

$$[N_A - N_D](ppm) = (0,105 \pm 0,008) \cdot H_{2454} (\text{см}^{-1}),$$

$$[N_A - N_D](ppm) = (1,0 \pm 0,15) \cdot H_{1290} (\text{см}^{-1}),$$

где  $H_{2802}$ ,  $H_{2454}$  и  $H_{1290}$  – амплитуды соответствующих пиков в полученных спектрах. Важно отметить, что эти эмпирические калибровочные коэффициенты получены с использованием концентрации нейтральных акцепторов, измеренной методом Холла, и, таким образом, в результаты измерений может вноситься погрешность.

Измерения FTIR-спектров проводятся в режиме пропускания, поэтому они обеспечивают определение средней по глубине образца концентрации частично компенсированной примеси бора. На рис. 4 приведены полученные в ходе работы спектры поглощения для трех образцов с различной концентрацией акцепторной примеси бора.

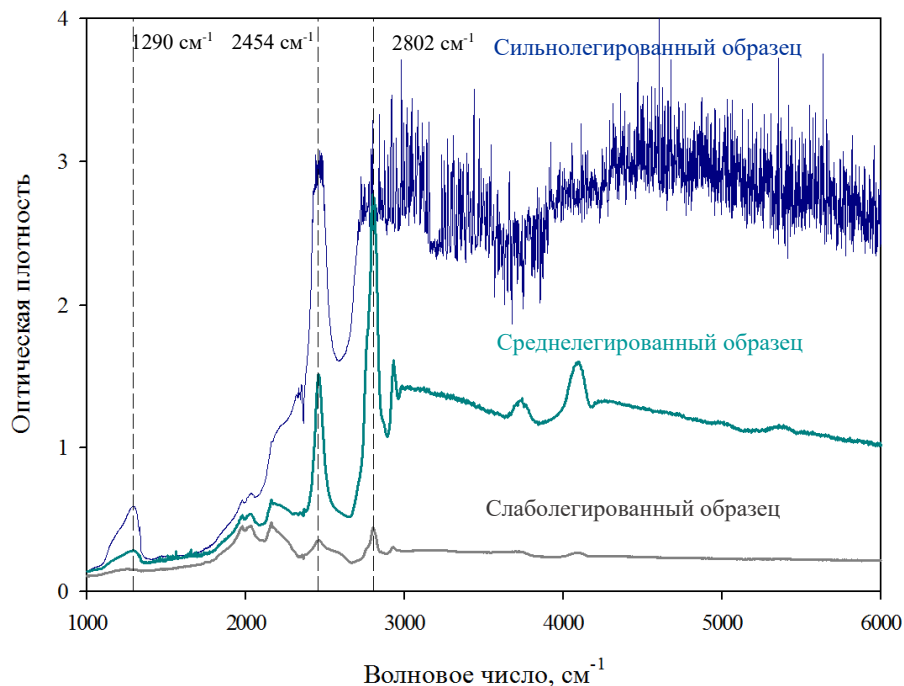


Рис. 4. Спектры поглощения для образцов с различной концентрацией акцепторной примеси бора

В наиболее легированном образце пик с волновым числом  $2802 \text{ см}^{-1}$  сильно размыт на фоне преобладающего мощного решеточного поглощения бора. Расчет значений концентраций для каждого из образцов проводился по ранее описанным формулам и алгоритму, учитывая особенности каждого спектра. Были получены следующие значения: для сильнолегированного образца –  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (по волновому числу  $1290 \text{ см}^{-1}$ ), для среднелегированного образца –  $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (по волновому числу  $2454 \text{ см}^{-1}$ ), для слабелегированного образца –  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (по волновому числу  $2802 \text{ см}^{-1}$ ). Трудности с определением концентрации примеси возникают для образцов с концентрациями ниже, чем  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что и определяет ограничения FTIR-спектроскопии применительно к алмазу, легированному бором.

Таким образом, в данной работе обсуждаются полученные экспериментальные данные оптического пропускания в УФ и ИК области спектра образцов алмаза с различным уровнем легирования бором. Показано наглядное отличие спектров краевого поглощения нелегированного и легированного образцов, а из спектров FTIR рассчитаны концентрации некомпенсированной примеси бора.

Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2024-0005 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-00).

### Список литературы

1. Zaitsev, A.M. Optical Properties of Diamond. Data Handbook; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2001.
2. Р.А. Хмельницкий, Г.В. Чучева, Н.Х. Талипов, Синтетический алмаз для электроники и оптики (ИКАР, М., 2017).
3. Зубков В.И. и др. Характеристика электрофизическими методами монокристаллического алмаза, легированного бором (обзор) // Журнал технической физики, 2023, том 93, вып. 1.
4. D. Howell, A.T. Collins, L.C. Loudin, P.L. Diggie, U.F.S. D'Haenens-Johansson, K.V. Smit, A.N. Katrusha, J.E. Butler, F. Nestola. Diam. Relat. Mater. 96, 207 (2019).

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ТИМОФЕЕВ А.А., НОВИКОВ Н.В.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная статья посвящена разработке модуля системы перемещений виртуальной системы микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа серии МРКТ. В работе рассматриваются различные виды систем перемещения, используемые в рентгеновских установках, на основе которых проектируется виртуальная модель, а также определяются её возможности, и описываются алгоритмы, моделирующие поведение реальной системы позиционирования объектов исследования, используемой в томографических установках серии МРКТ.

*Ключевые слова:* система перемещений, микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф

### Введение

В настоящее время рентгеновская компьютерная рентгеновская томография является одним из самых востребованных неразрушающих методов изучения внутреннего строения объектов. Наибольшее распространение в самых разных отраслях жизнедеятельности человека получила микрофокусная томография, позволяющая получать

рентгенографические изображения с большим коэффициентом прямого геометрического увеличения. Основным инструментом для проведения исследований в этом направлении является микрофокусный рентгеновский компьютерный томограф.

На базе малых предприятий Технопарка СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед» и ООО «Микротомография» налажено производство томографов серии МРКТ. Управление устройством, а также обработка результатов исследования производится в специализированном программном обеспечении, которое периодически необходимо тестировать и модернизировать. Для оптимизации данного процесса коллектив разработчиков нуждается в системе, которая будет способна моделировать поведение настоящей установки, так как к ней не всегда имеется доступ.

В дальнейшем модель виртуальной томографической системы будет способна имитировать поведение узла источника рентгеновского излучения и узла детектора рентгеновского излучения.

### **Системы перемещений рентгеновских установок**

Наличие системы перемещений в рентгеновских установках обусловлено необходимостью обеспечения высокой точности производимых измерений. Основное назначение системы позиционирования в томографической системе заключается в том, чтобы корректно располагать объекты исследования в пучке рентгеновского излучения.

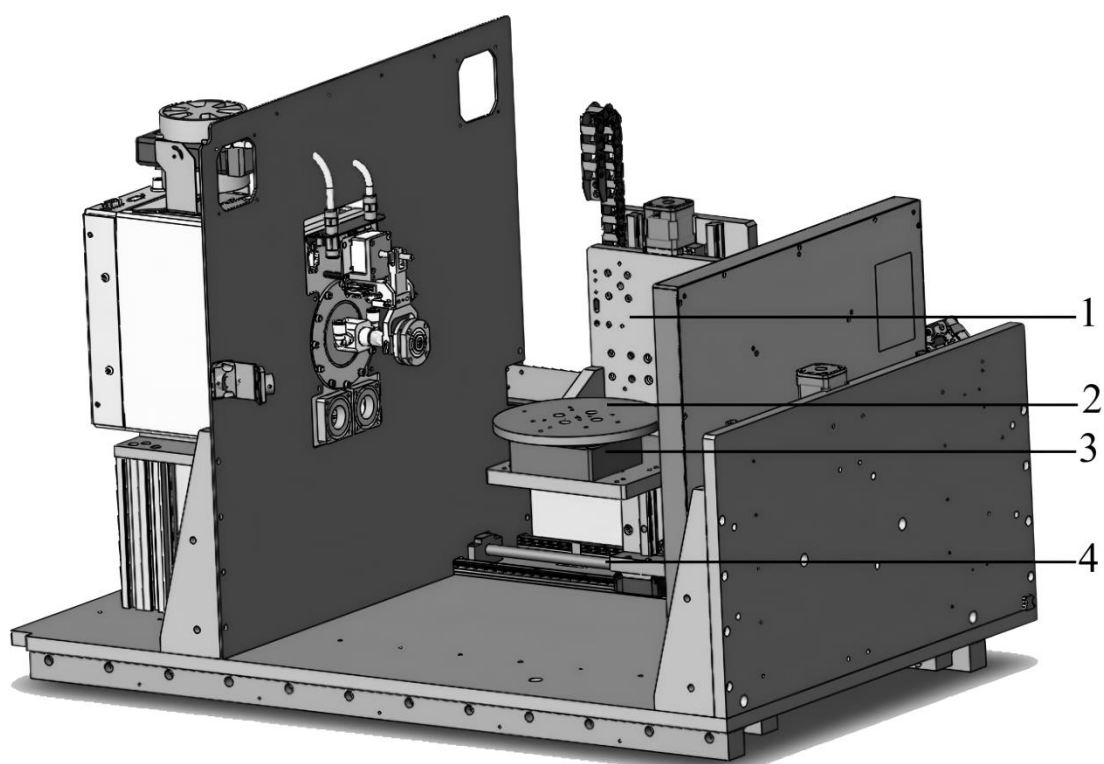
Типичная система перемещений в рентгеновской томографической установке состоит из двух компонентов, один из которых отвечает за линейное перемещение платформы с объектом исследования. Линейным перемещением называется такой тип движения, в процессе которого объект перемещается вдоль прямой линии. Система перемещений томографической системы должна обеспечивать позиционирование объекта по оси «источник-детектор», а также корректировать его положение по вертикали. Таким образом, первый компонент отвечает за перемещение платформы как по горизонтали, так и по вертикали. Для выполнения этих операций можно использовать различные устройства, такие как моторизованные линейные трансляторы, линейные манипуляторы, электрические линейные приводы, а также шарико-винтовые модули передачи.

Второй компонент отвечает за вращение объекта исследования вокруг вертикальной оси. Это необходимо для проведения процесса сбора набора угловых проекций, которые в последствии применяются для операции томографической реконструкции, результатом которой является получение томограммы исследуемого объекта. Для реализации такого типа перемещения можно применять поворотные манипуляторы, а также прецизионные кольцевые направляющие, моторизованные поворотные платформы.

Объект исследования должен быть жёстко закреплен на поворотном столике. В первую очередь это необходимо для предотвращения возможности смещения объекта в процессе набора проекционных данных. Отсутствие подобной системы приводит к наличию заметных артефактов на полученных томограммах. Важно понимать, что крепления, используемые для фиксации объекта, могут быть отражены на полученных рентгенограммах. В связи с этим, крепежную систему изготавливают из материала, который ослабляет рентгеновское излучение в значительно меньшей степени, чем сам объект.

### **Система перемещений томографической установки семейства МРКТ**

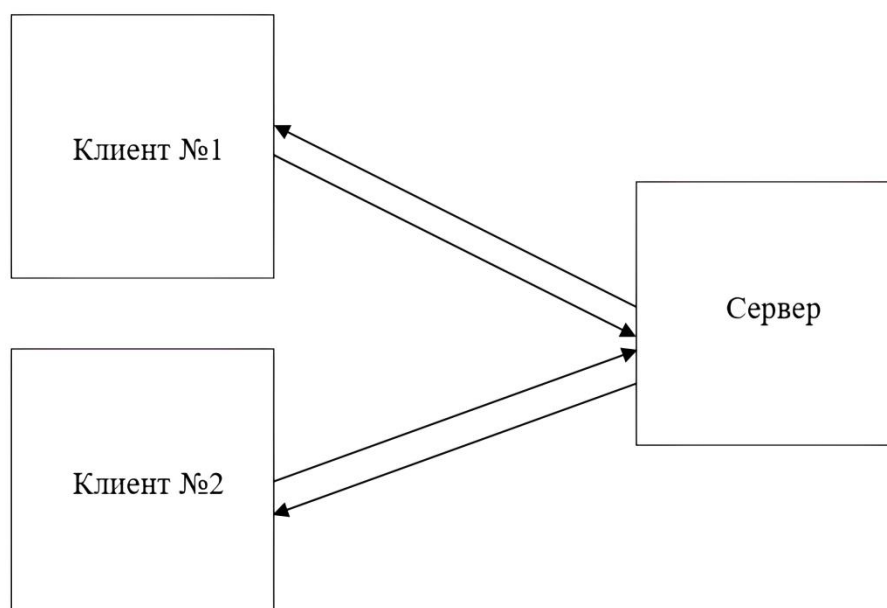
Устройство и внешний вид системы перемещений моделируемой томографической установки представлены на рис. 1. В рассматриваемой системе за вертикальные перемещения отвечает моторизованный вертикальный транслятор 1. Система крепления объекта 2 находится на поворотной платформе 3, обеспечивающей вращение объекта. Горизонтальные перемещения осуществляются при помощи шарико-винтового модуля передачи и шагового двигателя 4. Таким образом, линейные перемещения обеспечиваются моторизованным вертикальным транслятором и шарико-винтовым модулем передачи, а дуговые перемещения выполняет поворотная платформа.



*Рис. 1. Система перемещений томографической установки семейства МРКТ*

### **Принцип построения виртуальной модели**

Для реализации узлов виртуальной томографической системы правильнее всего использовать «клиент-серверную» архитектуру (рис. 2), состоящую из двух ключевых элементов клиента и сервера. Сервер отвечает на запросы, полученные от клиента, обеспечивая таким образом работу системы. В рамках этой структуры сервер выступает в роли томографа, а клиент представляет собой приложение, позволяющее взаимодействовать с моделируемым устройством через серверный компонент системы.



*Рис. 2. Клиент-серверная архитектура*

Для обмена данными между виртуальной томографической системой и приложением-клиентом необходимо использовать один протокол связи для обоих компонентов рассматриваемой системы. Встроенные в микрофокусные рентгеновские томографы серии МРКТ устройства управления используют TCP протокол связи. Использование именно этого протокола связи обусловлено надежностью процесса передачи данных, поскольку в такой системе данные обязательно дойдут до получателя.

### **Разработка программного модуля виртуальной системы перемещений**

Для разработки клиент-серверного приложения был использован Qt Creator – IDE для реализации приложений на языках программирования C++, JavaScript, Python и QML. Фреймворк Qt предоставляет доступ к таким библиотекам как «QTcpSocket» и «QTcpServer», что позволяет реализовать клиент-серверную архитектуру.

Разрабатываемая модель включает в себя функции, отвечающие за перемещения, характерные для микрофокусного рентгеновского компьютерного томографа семейства МРКТ. Виртуальная модель системы перемещений томографа моделирует непрерывное перемещение, перемещение на заданное расстояние, перемещение в заданную точку и остановку движения. Интерфейс приложения клиента представлен на рис. 3 и рис. 4.



Рис. 3. Интерфейс тестового приложения

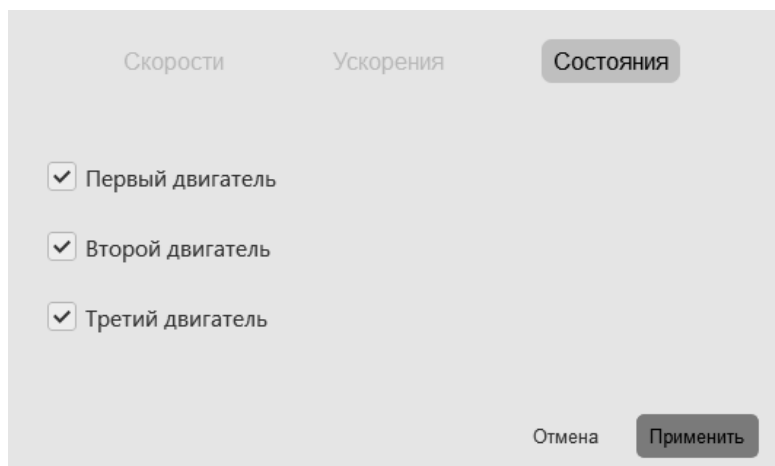


Рис. 4. Интерфейс окна настроек системы перемещений

### Список литературы

1. Шлее М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. СПб: БХВ-Петербург, 2015. 928 с.
2. Дуглас Крамер. Сети TCP/IP, том 1. Принципы, протоколы и структура. М.: «Вильямс», 2003. 880 с.
3. Qt Documentation [электронный ресурс]. – режим доступа: <https://doc.qt.io>, свободный – (20.04.2024).
4. Бессонов В.Б. Программно-аппаратные комплексы для микрофокусной рентгеновской компьютерной томографии: дисс. док. тех. наук. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2022 – 289 с.
5. Батрагин А.В. Методы и средства контроля основных параметров и характеристик рентгеновских томографов высокого разрешения: дисс. канд. тех. наук. – ТПУ, Томск, 2016 – 148 с.

## ТОПОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННОГО СИНАПСА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

УДОВИЧЕНКО В., КРОХМАНСКИЙ В., РЫНДИН Е.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Рассматривается принцип работы искусственного синапса. Разработана топология электронного синаптического интегрального элемента для технологии КМОП-50 нм и получены результаты его схемотехнического моделирования.

*Ключевые слова:* нейронные сети, искусственный синапс, КМОП-технология.

### **Введение**

В настоящее время актуальной задачей является разработка архитектур искусственных нейронных сетей, принципы работы которых основаны на функционировании человеческого мозга. Нейронные сети обрабатывают входные данные для самообучения и повышения точности своей работы с течением времени. После отладки алгоритмов обучения они становятся мощными инструментами искусственного интеллекта, позволяющими классифицировать данные с высокой скоростью и низким энергопотреблением [1].

Особый интерес представляют импульсные нейронные сети, в которых взаимодействие между искусственными нейронами осуществляется посредством прохождения импульсов определенной амплитуды через функциональные аналоги синапсов [1].

Целью данной работы является разработка топологии электронного синаптического интегрального элемента для автоматизированного проектирования нейронных сетей и получение результатов его схемотехнического моделирования.

### **Разработка топологии искусственного синапса**

Основными функциональными элементами импульсных нейронных сетей являются искусственные нейроны и синапсы. Синапсы характеризуются следующими основными параметрами: уровень проводимости, отношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях, число уровней многоуровневой перестройки проводимости, временная стабильность (способность сохранять резистивное состояние в течение длительного времени), циклическая устойчивость (способность синаптического элемента выдерживать определенное количество циклов переключения при сохранении основных параметров в пределах установленных допусков) [2].

Одним из эффективных вариантов реализации искусственных синапсов является предложенный в работе [3] интегральный электронный КМОП-синапс, принципиальная электрическая схема которого представлена на рисунке 1. Он состоит из управляющего КМОП-инвертора на транзисторах VT1, VT2 и нескольких пар p-канальных МДПтранзисторов, определяющих уровень проводимости синапса (синаптический вес). При отсутствии входных импульсов  $V_{IN}$ , высокий уровень напряжения на выходе управляющего инвертора подается на затворы МДП-транзисторов нижнего ряда, переводя их в закрытое состояние, в результате чего уровень проводимости синаптического элемента минимален, а выходной ток близок к нулю. При подаче импульса  $V_{IN}$  на вход



инвертора на его выходе устанавливается низкий уровень напряжения смещения  $V_B$ , в результате чего МДП-транзисторы нижнего ряда открываются. При этом состояние транзисторов верхнего ряда, истоки которых подключены к напряжению питания  $V_{DD}$ , определяется двоичным кодом на управляющей шине  $S_7-S_0$ . При подаче на разряд  $S_i$  управляющей шины логического нуля, соответствующий транзистор верхнего ряда переходит в открытое состояние, а при подаче логической единицы – в закрытое состояние. Ширина каналов каждой пары рканальных МДП-транзисторов, как показано на схеме, в два раза больше, чем у предыдущей пары  $W_i = 2W_{i-1}$ , в результате чего проводимость и выходной ток  $I_{out}$  синаптического элемента прямо пропорциональны двоичному коду на управляющей шине  $S_7-S_0$ .

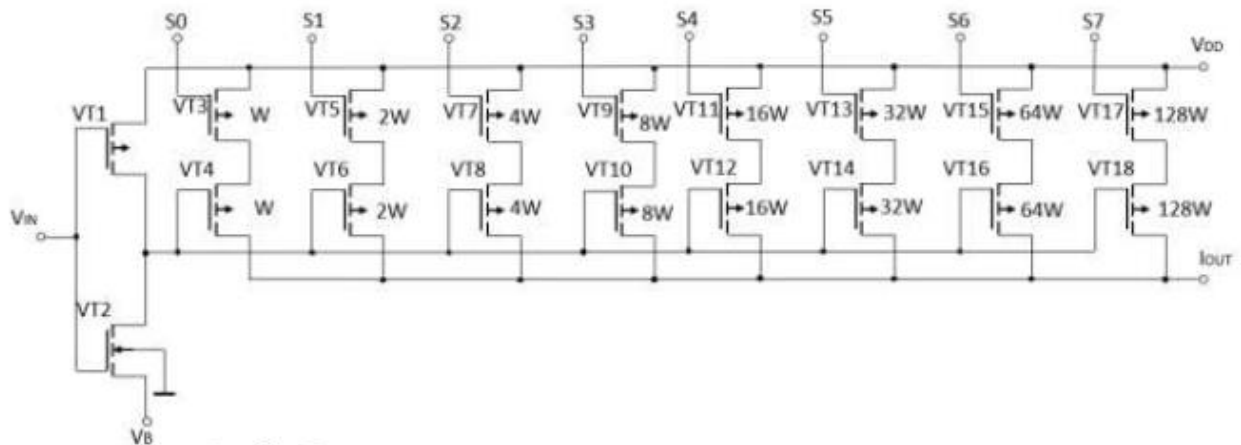


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема искусственного синапса

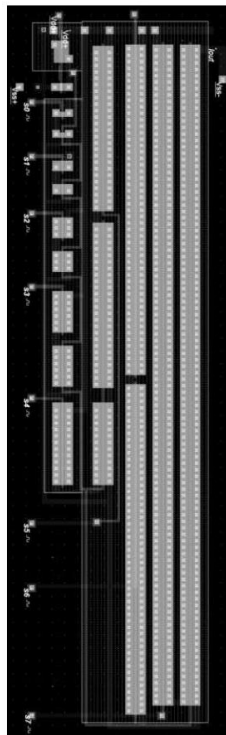


Рис. 2. Топология искусственного КМОП-синапса, разработанная для КМОП-технологии с проектной нормой 50 нм

Таким образом, рассмотренный электронный КМОП-синапс осуществляет прямое линейное преобразование цифрового управляющего кода в уровень синаптической проводимости (в синаптический вес) без промежуточного преобразования цифрового кода в уровень напряжения, требующего использования цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), значительно повышающего сложность и энергопотребление функционального синаптического элемента и вносящего дополнительные погрешности в устанавливаемые уровни проводимости.

Число  $N$  промежуточных уровней проводимости синаптического КМОП-элемента определяется разрядностью  $R$  цифровой управляющей шины в соответствии с выражением  $N = 2^R$  и может быть легко увеличено без нарушения функциональности интегрального элемента. В рассмотренном на рисунке 1 примере восьмиразрядная управляющая шина обеспечивает возможность установки 256 резистивных состояний синаптического элемента. Напряжение смещения  $V_B$  позволяет регулировать в широких пределах общий диапазон изменения проводимости синапса и величину шага перестройки проводимости.

Важным достоинством рассматриваемого интегрального синаптического элемента является возможность его реализации по любой современной КМОП-технологии без использования дополнительных материалов и технологических операций.

Разработка топологии искусственного синапса (рисунок 2) выполнена в системе автоматизированного проектирования Microwind 2 для КМОП-технологии с проектной нормой 50 нм. Ширина каналов первой пары р-канальных МДП-транзисторов VT3, VT4 минимальна и равна  $W = 100$  нм. Ширина каналов восьмой пары транзисторов VT17, VT18 максимальна и составляет  $128W = 12,8$  мкм. При этом площадь, занимаемая синаптическим элементом на кристалле интегральной схемы, равна  $(14 \times 3,75)$  мкм<sup>2</sup>.

Результаты схемотехнического моделирования разработанного интегрального синаптического КМОП-элемента, полученные для напряжения питания  $V_{DD} = 0,7$  В и напряжения смещения  $V_B = 0,36$  В, приведены на рисунке 3.

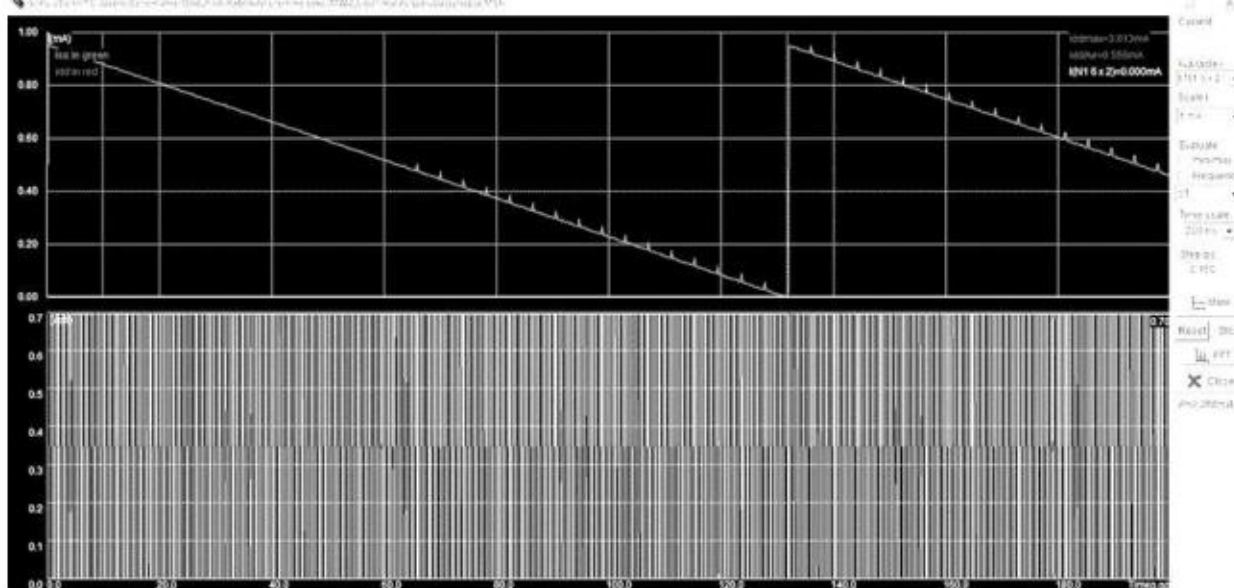


Рис. 3. Результаты схемотехнического моделирования интегрального КМОП-синапса

Приведенные результаты моделирования демонстрируют линейность перестроечной характеристики разработанного интегрального КМОП-синапса (линейную зависимость

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

синаптического тока, приведенного на верхней диаграмме рисунка 3, от двоичного управляющего кода на нижней диаграмме).

### **Заключение**

Разработана топология электронного синаптического интегрального элемента для технологии КМОП-50 нм, осуществляющего прямое линейное преобразование цифрового управляющего кода в уровень синаптической проводимости без использования ЦАП, что обеспечивает минимизацию энергопотребления и площади, занимаемой элементом на кристалле. Полученные результаты схмотехнического моделирования разработанного интегрального КМОП-синапса подтверждают линейность его перестроечной характеристики.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант FSEE-2020-0013.

### **Список литературы**

1. Basheer I., Hajmeer M. Artificial Neural Networks: Fundamentals, Computing, Design, and Application // Journal of Microbiological Methods. – 2000. – N. 43. – P. 3-31.
2. Рындин Е. А., Маврин И. А., Андреева Н. В., Лучинин В. В. Нейроморфный электронный модуль, ориентированный на использование мемристорной ЭКБ, для распознавания изображений // Нано- и микросистемная техника. – 2022. – Т.24. – №6. – С. 293-303.
3. Интегральный электронный КМОП синапс / Рындин Е.А., Андреева Н.В. // Патент на изобретение 2808951 от 05.12.2023.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВУДА И РОЗЕ В ПРЫЖКОВОЙ МОДЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ**

УРМУРЗИН Д.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

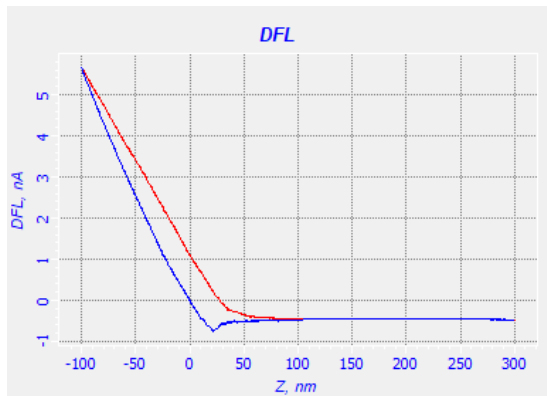
В настоящий момент для исследования физики поверхностных явлений существует множество методик. Для исследования рельефа и физических свойств структур используются методики с применением зонда. Сканирующая зондовая микроскопия охватывает в настоящее время широкий спектр методов исследования поверхности. Среди них можно назвать ее яркого представителя такого как атомно-силовая микроскопия. При снятии данным методом можно получить данные высоты микрорельефа до нанометровых разрешений. Ещё можно изучить различные локальные свойства образца на поверхности: адгезионные, механические, электрофизические, магнитные и другие. В данной работе более подробно будет рассмотрены особенности сканирования при нагревании образца. [1]-[4]

Силовые кривые являются одним из ключевых методов в АСМ для изучения в каждой точке образца распределения различных сил, а также ее свойств такие как проводимость, термоэлектрические, потенциал поверхности, работу выхода, диэлектрическую проницаемость и т.д. Принцип Прыжковой АСМ заключается в последовательном снятии и обработке силовых кривых в каждой точке измерения в процессе сканирования.

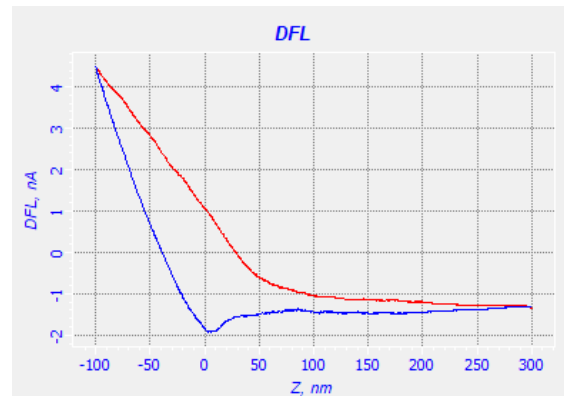
Ключевым вопросом в данной работе является влияние воздействия температуры на взаимодействие зонда с поверхностью нагретого образца, вид силовых кривых и карт

Адгезии. Были исследованы образцы сплав Вуда и Розе в прыжковой моде с помощью зонда модели NSG01. На рисунке 1 и 2 показаны изменения наклона силовых кривых образцов с изменением температуры из комнатной к ближайшей к точке плавлению. Температура фазового перехода сплава Вуда 72°C градуса, а сплава Розе при 82°C.

Также на рисунках 3 предоставим изменение карт Адгезии при изменении температур данного образца.

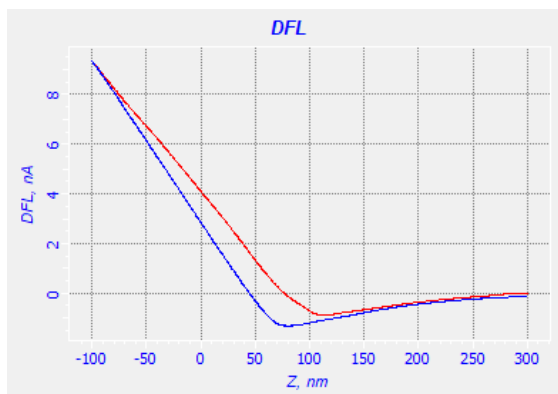


(a)

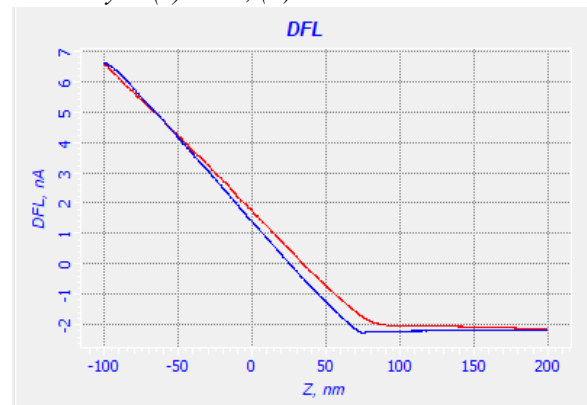


(b)

Рис. 1. Зависимость  $DFL(Z)$  в точке Сплав Вуда (a) 24°C; (b) 64°C

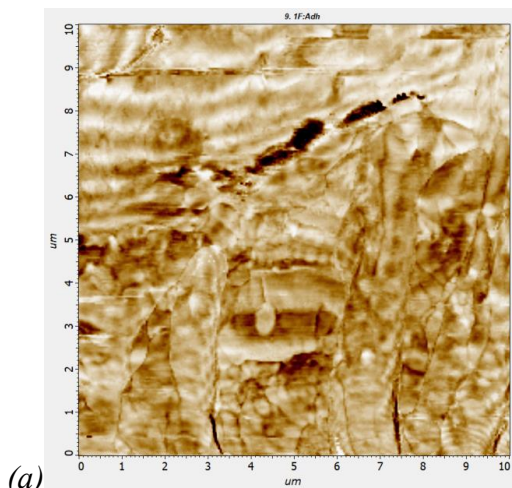


(a)

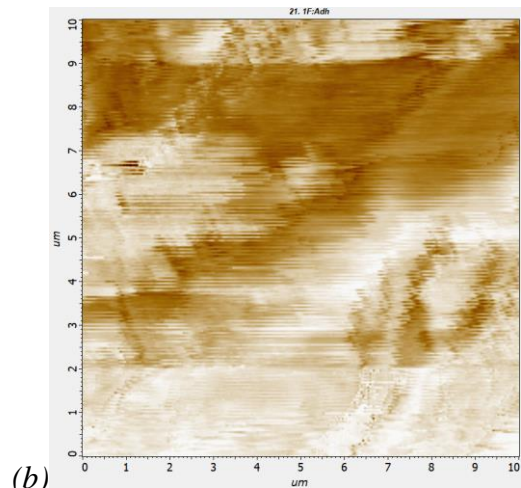


(b)

Рис. 2. Зависимость  $DFL(Z)$  в точке Сплав Розе (a) 24°C; (b) 74°C



(a)



(b)

Рис. 3 Карты Адгезии Сплав Вуда (a) 24°C; (b) 64°C

## Список литературы

1. Tips nano сайт. – URL: <https://tipsnano.ru/catalog/afm-standard/nsg01/> (23.04.24)
2. Nt-Mdt сайт. – URL: <https://www.ntmdt-si.ru/resources/spm-principles> (23.04.24)
3. В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, Н. В. Пермяков А92 Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
4. Е.Г. Дедкова, А.А. Чуприк, И.И. Бобринецкий, В. К. Неволин «Приборы и методы зондовой микроскопии»: учеб. пособие. Изд-во Москва, 2011. 160 с.

## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГИБКИЙ ТЕРМОМЕТР

ФЕЛЬДЕ А.А., СИДОРОВА С.В.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

**Аннотация.** Представлена актуальность разработки эластичного датчика температуры на основе сегнетоэлектрического материала. Приведена структурная схема чувствительного элемента гибкого термометра. Выбраны материалы чувствительного и проводящих слоев изделия. Определены ключевые операции, влияющие на качество и функциональные характеристики рассматриваемого устройства. Подобрано технологическое оборудование для ионной и плазменной обработок и магнетронного распыления при формировании элементов гибкого термометра. Определена толщина тонкопленочных медных электродов. Показаны экспериментальные зависимости емкости чувствительного элемента от температуры.

*Ключевые слова:* температура, эластомер, сегнетоэлектрики, термометр, плазменная обработка

### Введение

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной электрической поляризацией, то есть электрическим дипольным моментом, в определенном диапазоне температур и в отсутствие внешних электрических полей. Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков может существенным образом изменяться под влиянием внешних воздействий: электрических полей, давления, температуры и других внешних факторов [1,2].

На основе сегнетоэлектрических материалов, благодаря их уникальным свойствам, производят различные датчики, в том числе датчики температуры. Добавление частиц сегнетоэлектрика в эластомер позволяет создать сегнетоэлектрический гибкий термометр (СГТ), что увеличивает возможности его применения и обеспечивает плотное прилегание датчика к измеряемой поверхности.

Датчик температуры находит применение во многих сферах жизни от медицины и спорта до машиностроения. Преимущество гибкого датчика заключается в возможности его размещения на неровные поверхности (например, трубы). При формировании сегнетоэлектрического эластомера больших размеров существует возможность измерения температуры на больших площадях даже неровных поверхностей. По сравнению с бесконтактными датчиками температуры, гибкий датчик может обеспечить более точные показания температур за счет плотного прилегания к измеряемой поверхности.

Интерес представляет сам чувствительный эластичный элемент датчика, который содержит в себе мелкодисперсные частицы (0,45 – 0,55 мкм) сегнетоэлектрика титаната бария ВаTiO<sub>3</sub> [3], способного поляризоваться и реагировать на изменение температуры. В качестве эластичной матрицы выступает силикон.

Чувствительный элемент гибкого термометра изготавливается в соответствии со структурной схемой (рис. 1).

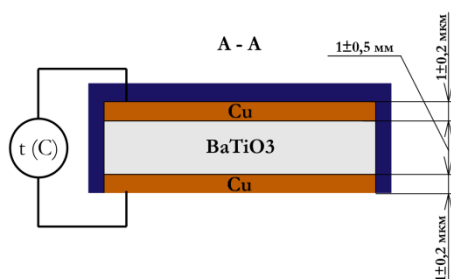


Рис. 1. Структурная схема термометра

Цель работы – исследование характеристик чувствительного элемента сегнетоэлектрического гибкого термометра на основе BaTiO<sub>3</sub>.

### Технология и оборудование для формирования чувствительного элемента СГТ

Технология изготовления чувствительного элемента СГТ [4] включает три ключевых операции: ионная обработка, магнетронное распыление и плазменная обработка (рис. 2).

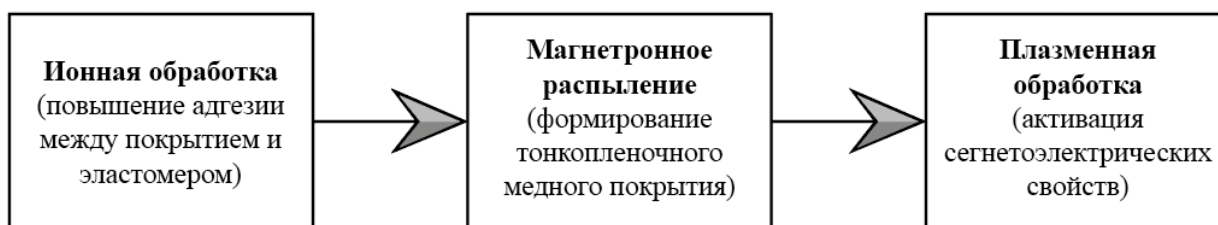


Рис. 2. Структурная схема термометра

На установке MBTU-11-1MC (рис. 3, а) проходят операции ионной обработки (рис. 3, б) и магнетронного распыления (рис. 3, в) для формирования тонкопленочных медных электродов.

Предварительная ионная обработка необходима для повышения адгезии между электродом и эластомером [5].

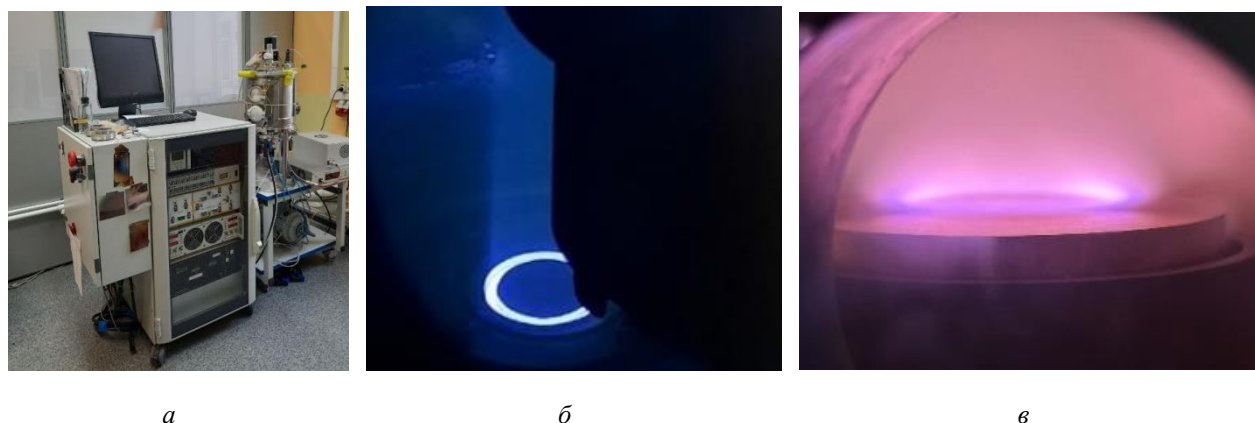


Рис. 3. Установка MBTU-11-1MC (а) и технологические источники: ионный источник (б), магнетрон (в)

Активация свойств титаната бария проводится на установке TRION (рис. 4) в индуктивно-связанной плазме.

Измерительный стенд (рис. 5) для исследования чувствительности датчика температуры состоит из LCR-станции и термопары с выводом данных на ноутбук.





Рис. 4. Установка TRION

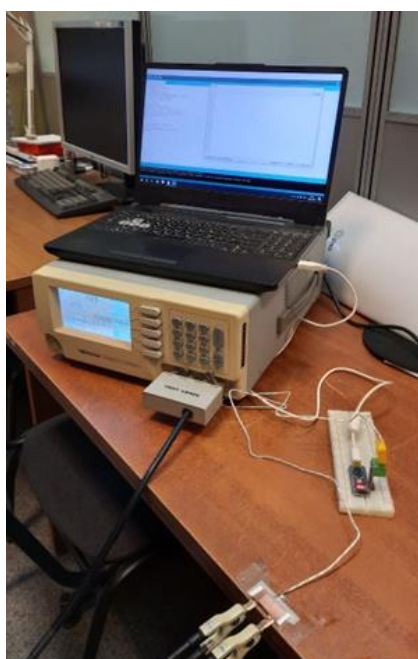


Рис. 5. Измерительный стенд

Чувствительный элемент СГТ подключается к LCR-станции с помощью контактов, также к нему прикладывается термопара для оценки реальной температуры образца. Фиксируются показания емкости и температуры. На основании данных строятся зависимости емкости от температуры образца.

### **Проведение исследований и обсуждение результатов**

При изменении температуры напряженность частиц титаната бария изменяется, что влечет за собой изменение емкости. Электроды на поверхности эластомера необходимы для контроля этих изменений. Толщина электродов – 500 нм. В качестве контактов – медный скотч.

С помощью LCR-станции осуществляется измерение емкости. Теоретическая зависимость емкости от температуры (рис. 6) отображает увеличение емкости при уменьшении температуры.

Исследованы зависимости характеристик чувствительного элемента после плазменной обработки. Проведено несколько циклов нагрева и охлаждения и построены графики (рис. 7). Характеристики после плазменной обработки сходятся с теоретической кривой.

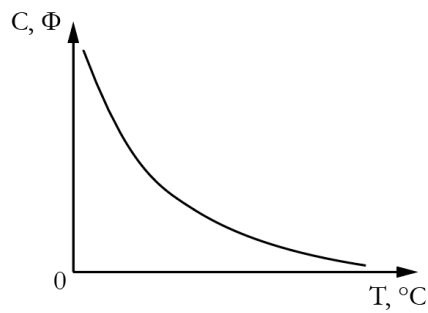


Рис. 6. Теоретическая зависимость емкости чувствительного элемента термометра от температуры

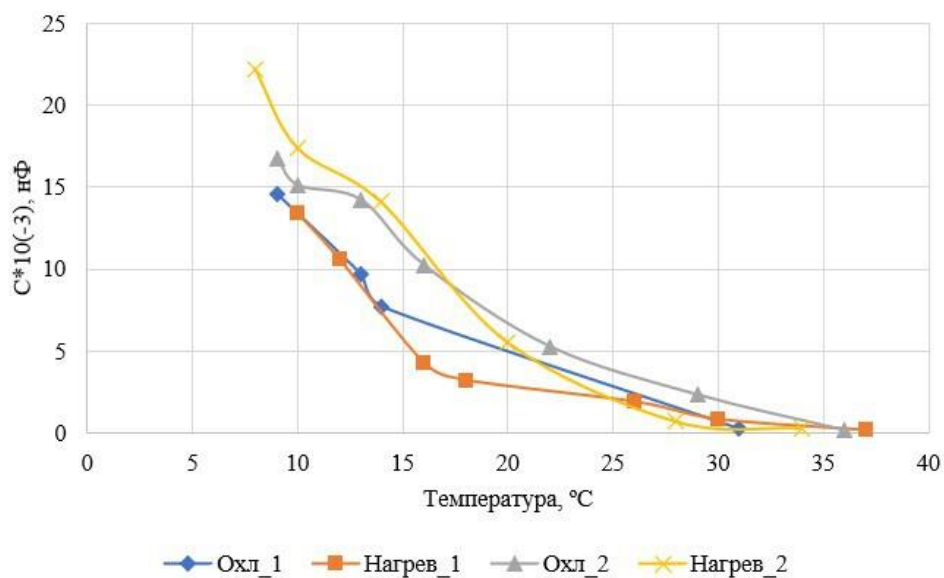


Рис. 7. Экспериментальная зависимость емкости чувствительного элемента от температуры

Усредненные зависимости нагрева и охлаждения (рис. 8) не совпадают между собой, но коррелируются, что говорит о воспроизводимости показаний при нагреве и охлаждении.

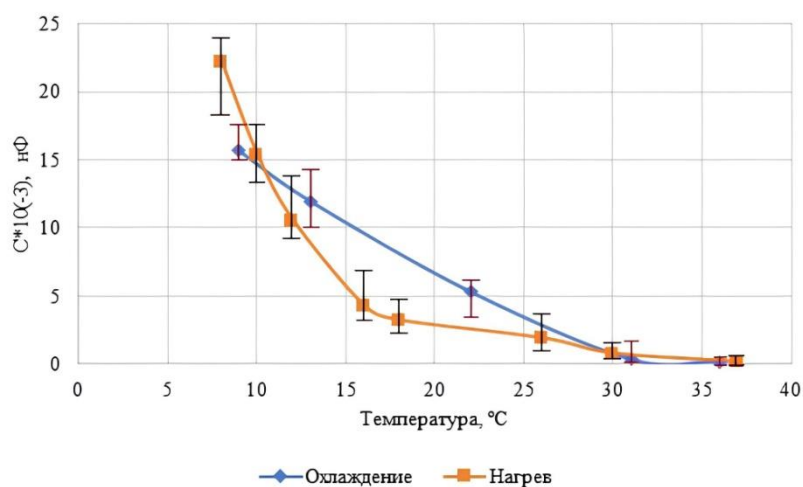


Рис. 8. Средняя зависимость емкости чувствительного элемента от температуры (для 3 циклов)



ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

Наибольшей чувствительностью чувствительный элемент гибкого термометра обладает в диапазоне 5 – 15 °С.

Плазменная обработка влияет на чувствительность датчика в зависимости от режима процесса. Исследован чувствительный элемент после плазменной обработки в течение 6 минут при мощности 250 Вт в среде аргона.

### **Заключение**

Актуальность разработки эластичного датчика температуры на основе сегнетоэлектрического материала связана с формированием сегнетоэлектрического эластомера больших размеров, что дает возможность проводить измерения температуры на больших площадях даже неровных поверхностей. Определение ключевых операций, влияющих на качество и функциональные характеристики рассматриваемого устройства, позволило реализовать процесс формирования электродов в одном вакуумном цикле с подготовкой поверхности эластомера.

Получены тестовые образцы чувствительного элемента. Показаны экспериментальные зависимости емкости чувствительного элемента от температуры, которые коррелируются с теоретической кривой зависимости емкости сегнетоэлектрика от температуры.

В дальнейшем планируется провести серию экспериментов по определению чувствительности датчика в зависимости от плазменной обработки.

### **Список литературы**

1. Дж. Барфут. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. Издательство «Мир», 1970.
2. Shin S. H. et al. Ferroelectric zinc oxide nanowire embedded flexible sensor for motion and temperature sensing. ACS applied materials & interfaces, 2017.
3. Бондаренко Г.Г., Кабанова Т.А., Рыбалко В.В. Материаловедение: учебник для среднего профессионального образования – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 329 с.
4. А.А. Фельде, С.В. Сидорова. Эластичный датчик температуры. XI научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Том 1. Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. – 275 с.
5. А.Д. Купцов, С.И. Егорова, А.А. Фельде, В.С. Щербакова, А.М. Базиненков, С.В. Сидорова. Вакуумная наука и техника. Материалы XXIX научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Москва, 2022. С. 253-262.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТАНДЕМНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ, НАНЕСЕННЫХ НА ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**

Фокина Н.А.<sup>1</sup>, Ненашев Г.В.<sup>2</sup>, Алешин А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Тандемные солнечные элементы (СЭ), состоящие из нижнего слоя кремния и верхнего слоя перовскита, представляют собой многообещающее сочетание простоты изготовления и эффективного преобразования энергии. Для создания образца использовался раствор металлоорганического перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  (beI2) в N,N-Диметилформамиде (DMF) и тонкопленочные кремниевые солнечные элементы - p-n-гетероструктуры на основе a-Si:H/a-SiC:H/c-Si.

Эти структуры представляют собой гетеропереходные солнечные элементы, полученные с помощью гетероструктурной (НЖТ) технологии. В данном исследовании были проанализированы импеданс-характеристики полученных структур при температуре 300 К.

*Ключевые слова:* металлоорганический перовскит, солнечные элементы, электропроводность, импедансная спектроскопия.

Обширные международные исследования, проведенные в последнее время, выявили значительный потенциал металлоорганических перовскитных материалов для применения в оптоэлектронике; эти области применения включают солнечные элементы (СЭ) [1], светодиоды [2], фотоприемники [3], резистивные запоминающие устройства [4-6]. Наивысший сертифицированный КПД для солнечных элементов на основе кремния в 2024 году достиг 27,6% [7]. В настоящее время наиболее перспективным сочетанием простоты изготовления и эффективности преобразования энергии являются тандемные солнечные элементы, которые представляют собой многослойную структуру из кремния с низким содержанием кремния и перовскита с высоким содержанием кремния. В 2024 году исследователи из китайской фотоэлектрической компании LONGi создали тандемный солнечный элемент на основе пленок металлоорганических перовскитов, нанесенных на тонкопленочные кремниевые солнечные элементы с эффективностью 35,9% [8]. Эти результаты подтверждают перспективность изучения тандемных солнечных элементов на основе пленок металлоорганических перовскитов.

Из рисунка 1 видно, что при увеличении напряжения сопротивление уменьшается. Это происходит за счет уширения области ионизации примесей и возбуждения дополнительных носителей заряда. На частотной зависимости действительной составляющей сопротивления (рисунок 2.а) можно заметить, что в отсутствии напряжения в темноте и при освещении имитатором солнечного света сопротивление падает. Такая же тенденция наблюдается и на частотной зависимости мнимой составляющей сопротивления (рисунок 2.б). На рисунках 3-4 можно увидеть, что при увеличении напряжения в темноте и при освещении имитатором солнечного света сопротивление уменьшается. Данное поведение соответствует типичному тандемному СЭ перовскит/кремний.

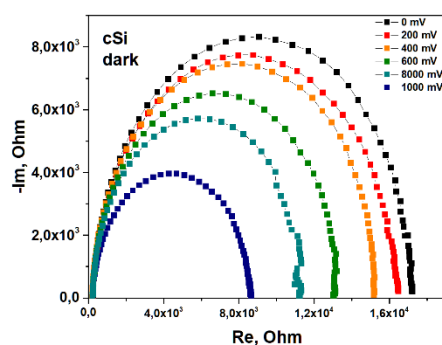


Рис. 1. Импеданс характеристика структуры cSi под приложением разного напряжения в темноте в условиях окружающей среды

График Коула-Коула для образца cSi демонстрирует типичное поведение полупроводника. Это проявляется в резком снижении импеданса при увеличении напряжения и при воздействии света. С другой стороны, для образца "bel2/cSi" можно заметить, что график Коула-Коула отражает комбинацию электрических свойств подложки cSi и свойств слоя перовскита  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  с широкой запрещенной зоной.

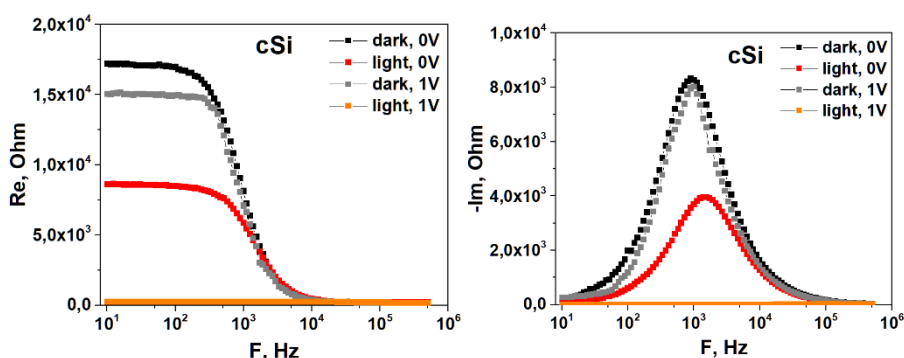


Рис. 2. Частотная зависимость действительной (a) и мнимой (b) части импеданс характеристики структуры cSi под приложением разного напряжения в темноте и при свете в условиях окружающей среды

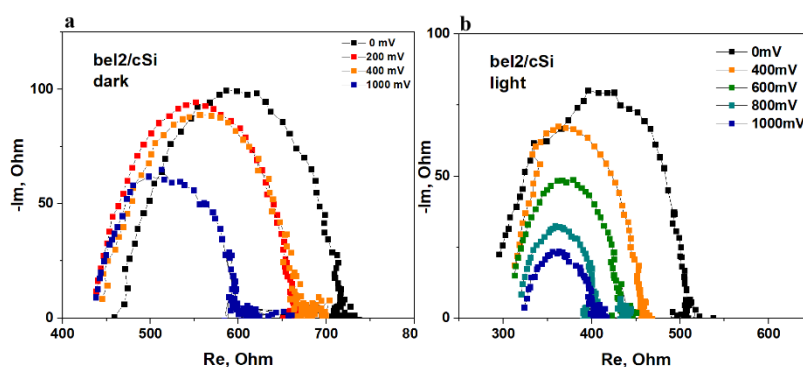


Рис.3. Импеданс характеристика структуры bel2/cSi под приложением разного напряжения в темноте(a) и при освещении (b) в условиях окружающей среды

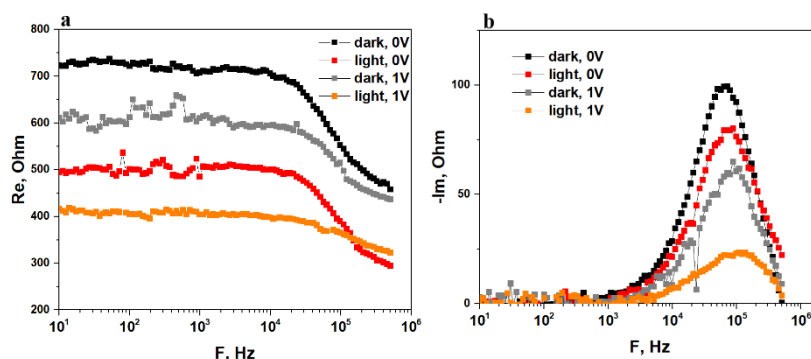


Рис. 4. Частотная зависимость действительной (a) и мнимой (b) части импеданс характеристики структуры bel2/cSi под приложением разного напряжения в темноте и при свете в условиях окружающей среды

## Заключение

Изменения на графике Коула-Коула проявляются в виде смещения пиков импеданса, изменения формы кривой (линии становятся более неровными) и сдвига величины электрического сопротивления. Такие изменения указывают на различные процессы, связанные с переносом заряда или активацией зарядов в слое  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  и подложке cSi.

Эти результаты позволяют увидеть различия между солнечным элементом на основе чистого кремния и tandemного солнечного элемента на основе пленок металлоорганических перовскитов и кремния с точки зрения их импеданса, формы кривой и электрического сопротивления. Это имеет большое значение для изучения переноса и активации заряда в

этих образцах, что способствует разработке новых материалов и повышению эффективности солнечных элементов и других электронных устройств.

### Список литературы

1. H.-S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im, K.-B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, J.-H. Yum, and J. E. Moser, Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%, *Scientific reports* 2 (2012) 591
2. H. Cho, S.-H. Jeong, M.-H. Park, Y.-H. Kim, C. Wolf, C.-L. Lee, J. H. Heo, A. Sadhanala, N. Myoung, and S. Yoo, Overcoming the electroluminescence efficiency limitations of perovskite light-emitting diodes, *Science* 350 6265 (2015) 1222
3. J. Choi, S. Park, J. Lee, K. Hong, D. H. Kim, C. W. Moon, G. D. Park, J. Suh, J. Hwang, and S. Y. Kim, Organolead Halide Perovskites for Low Operating Voltage Multilevel Resistive Switching, *Adv. Mater.* 28 31 (2016) 6562
4. Z. Liu, P. Cheng, R. Kang, J. Zhou, X. Zhao, J. Zhao, Z. Zuo, Photo-Enhanced Resistive Switching Effect in High-Performance MAPbI<sub>3</sub> Memristors, *Adv. Mater. Interfaces* 10 (2023) 2201513
5. G. V. Nenashev, A. N. Aleshin, I. P. Shcherbakov, V. N. Petrov, Effect of temperature variations on the behavior of a two-terminal organic–inorganic halide perovskite rewritable memristor for neuromorphic operations, *Sol. State Com.* 348-349 (2022) 114768
6. A. M. Ivanov, G.V. Nenashev, A.N. Aleshin, Low-frequency noise and impedance spectroscopy of device structures based on perovskite-graphene oxide composite films, *J Mater Sci: Mater Electron* 33 (2022) 21666–21676
7. Fang, Z., Zeng, Q., Zuo, C., Zhang, L., Xiao, H., Cheng, M., et al. Perovskite-based tandem solar cells, *Science Bulletin* 66 6 (2020) 621-636
8. D. Turkey, K. Artuk, X.-Y. Chin, D. Jacobs, S.-J. Moon, High-efficiency (>30%) monolithic perovskite-Si tandem solar cells with flat front-side wafers, *Research Square*, posted 04 Jun 2023

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗЕЛЕНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ И ОКСИДА НИКЕЛЯ

ХАЛУГАРОВА К., СПИВАК Ю. М.

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)»*

**Аннотация.** В УНЛ «Наноматериалы» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» активное внимание уделяется получению и исследованию свойств новых наноматериалов и нанокомпозитов, в том числе полученных новыми методами. В данной статье приводится обзор применения метода зеленого синтеза для получения наночастиц никеля и оксида никеля.

*Ключевые слова:* наночастицы, никель, зеленый синтез, сканирующая электронная микроскопия

### Введение

В последнее десятилетие новые методы синтеза стали интересной и перспективной областью науки и технологии. Для получения наноматериалов определенного размера, формы и функциональности в существующей литературе исследовались и активно применялись два фундаментальных принципа синтеза: «сверху-вниз» и «снизу-вверх» (или «top-down» и «bottom-up», рис. 1.) [1, 2].

Если синтезированные наноматериалы подлежат применению в определенных областях, то их применение может быть ограничено в связи со следующими моментами:

- стабильность в агрессивной среде;
- биоаккумуляция;
- токсичность частиц для применяемой среды;
- опасность и токсичность при их получении;

- переработка/повторное использование.



Рис. 1. Методы синтеза металлических наночастиц

В действительности же желательно, чтобы свойства, поведение и типы наноматериалов были улучшены таким образом, чтобы соответствовать вышеупомянутым пунктам.

В связи с этой актуальной проблемой последние несколько десятилетий исследуется и применяется альтернативный метод получения наночастиц – зеленый синтез [3]. Метод зеленого синтеза заключается в получении наночастиц восстановлением соли металла, где в качестве восстанавливающих солей металлов и стабилизирующих наночастицы реагентов используются различные продукты метаболизма растений и микроорганизмов (грибы, дрожжи) [4].

В литературных источниках отмечаются способы получения наночастиц никеля и оксида никеля методом зеленого синтеза как с применением экстрактов растений [5,6].

В работе [7] использовался водный экстракт кожуры Citrus Paradise (грейпфрута) для синтеза наночастиц никеля для применения нейтрализации красителя. Для получения наночастиц использовались 0,3 М раствор нитрата никеля (18,2 г нитрата никеля на 333 мл дистиллированной воды) и 30 мл экстракта грейпфрута. Через 1 день после смешивания растворов на дне сосуда образовались осадки голубоватого цвета. Эти осадки затем центрифугировали, фильтровали, а остаток многократно промывали дистиллированной водой для удаления нежелательных материалов и получения наночастиц никеля. СЭМ-изображения полученных наночастиц приведены на рис. 2. Полученные наночастицы имеют сферическую форму и полидисперсию с диаметром в диапазоне 50-70 нм.

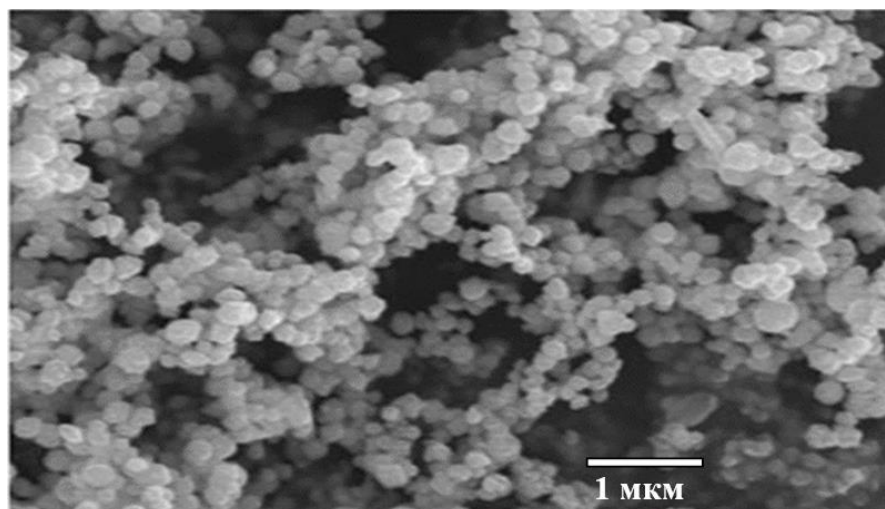


Рис. 2. СЭМ-изображение наночастиц никеля, полученных с использованием экстракта кожуры грейпфрута [7]

Авторы работы [5] наночастицы оксида никеля (NiO NPs) были синтезированы с использованием экстракта листьев *Berberis baluchistanica* (Барбарис). 20 мл экстракта листьев барбариса были смешаны с 0,3М раствора нитрата никеля в течение 3 часов при температуре 60°C, полученный осадок подвергался промывке и центрифугированию. Для формирования оксида наночастицы прокаливались в воздушной печи в течение 3 часов при температуре 60°C. Форма наночастиц была сильно агломерирована, и в основном они представляли собой скопления наночастиц. Такая агломерация может быть обусловлена магнитным взаимодействием и полимерной адгезией наночастиц.

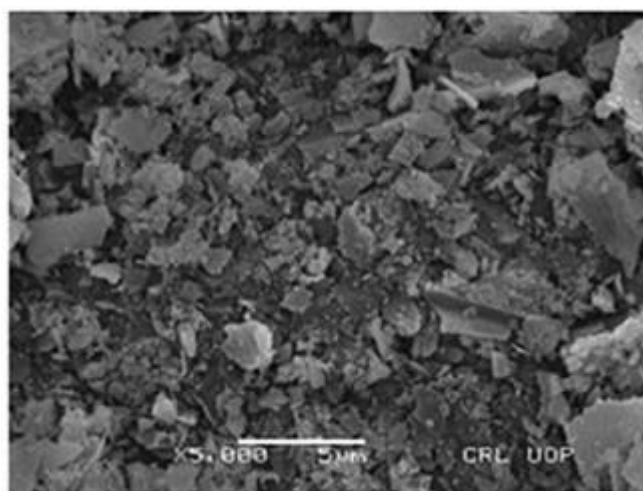
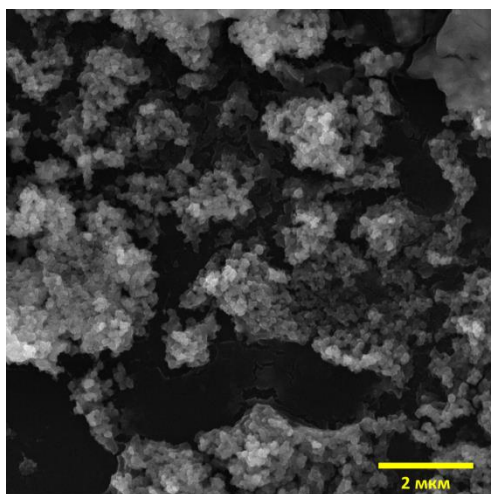


Рис. 3. СЭМ-изображение наночастиц оксида никеля, полученных с использованием экстракта барбариса [5]

Для получения наночастиц никеля авторы работы [10] использовали экстракт растения *Calotropis gigantea* (Калотропис гигантский). 10 мл одного ммолья раствора нитрата никеля смешивали с 10 мл раствора мочевины (0,1 М), затем в смесь добавляли 20 мл 20%-ного метанольного экстракта *Calotropis gigantea* и доводили pH до 10, и затем нагревалось до 80°C. Полученный осадок сушился при температуре 100°C в течение 2 недель. Для получения наночастиц оксида никеля проводили ту же реакцию, что и выше, но pH

реакционной смеси составлял 12. Продукт прокаливали при температуре 300°C в течение двух часов.

В УНЛ «Наноматериалы» нами работ [9,10] были получены и исследованы наночастицы никеля с использованием экстракта растения *F. Officinalis* (Дымянка лекарственная). Экстрактом дымянки лекарственной восстанавливался сульфат никеля. Были получены агломераты размерами от 10 мкм до 50 мкм, состоящие из мелких частиц. Для получения наночастиц оксида никеля наночастиц, полученные вышеописанным методом, подвергались термообработке при температуре 500°C. Синтезированные наночастицы имеют пористую структуру и удельную площадь поверхности 130 м<sup>2</sup>/г и диаметрами пор 33 и 56 нм.



*Рис. 4. СЭМ-изображение наночастиц оксида никеля, полученных с использованием экстракта Дымянки лекарственной*

## **Выводы**

Метод зеленого синтеза с применением растительных экстрактов активно применяется для получения и исследования наночастиц никеля и его оксида. Чаще всего используются растительные экстракты, поскольку они экологичны, нетоксичны и представляют собой экономически эффективный биологический источник. Получаемые наночастицы в зависимости от используемых реактивов обладают разной формой и размерами.

## **Список литературы**

1. Rane A. V. et al. Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites //Synthesis of inorganic nanomaterials. – Woodhead publishing, 2018. – С. 121-139.
2. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В. А. Мошникова, А. И. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 220 с.
3. Kharissova, O. V., Kharisov, B. I., Oliva González, C. M., Méndez, Y. P., & López, I. (2019). Greener synthesis of chemical compounds and materials. *Royal Society Open Science*, 6(11), 191378.
4. Халугарова К. Краткий обзор метода зеленого синтеза для получения наночастиц металлов и их оксидов//Наука настоящего и будущего Сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2023. – Т. 1. – С. 248-251
5. Uddin S. et al. Green synthesis of nickel oxide nanoparticles using leaf extract of *Berberis balochistanica*: Characterization, and diverse biological applications //Microscopy Research and Technique. – 2021. – Т. 84. – №. 9. – С. 2004-2016.
6. Khalugarova K. et al. Green Synthesis of Nickel Nanoparticles using Plant Extract //Journal ISSN. – 2023. – Т. 2766. – С. 2276.



7. Kiran S. et al. Green synthesis of nickel nanoparticles using fruit peels of citrus paradise for remediation of Congo red dye //Journal of the Mexican Chemical Society. – 2021. – Т. 65. – №. 4. – С. 507-515.
8. Din M. I. et al. Single step green synthesis of stable nickel and nickel oxide nanoparticles from Calotropis gigantea: catalytic and antimicrobial potentials //Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. – 2018. – Т. 9. – С. 29-36.
9. Халугарова К. и др. Получение наночастиц никеля методом «зеленого» синтеза //Микроэлектроника и информатика-2023. – 2023. – С. 273-278.
10. Khalugarova K. et al. Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract //2023 Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP). – IEEE, 2023. – С. 60-62.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЗЕЛЕНОГО СИНТЕЗА

ХАЛУГАРОВА К.<sup>1</sup>, САТТОРОВ М. Ш.<sup>1,2</sup>, СПИВАК Ю. М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)»

<sup>2</sup>Хуанчжунский университет науки и технологий (HUST)

**Аннотация.** В данной работе были исследованы образцы наночастиц на основе никеля, полученные методом зеленого синтеза с использованием экстракта растения. Получены изображения поверхности методом сканирующей электронной микроскопии и методом конфокальной микроскопии.

*Ключевые слова:* наночастицы, никель, зеленый синтез, сканирующая электронная микроскопия, конфокальная микроскопия

### Введение

В последнее время наночастицы металлов и их оксидов привлекают большое внимание для применения в различных областях [1-6]. Актуальной задачей является обеспечение низких уровней токсичности наночастиц для применения их в биомедицинской области. Уменьшение токсичных прекурсоров в синтезе частиц является одним из способов решения данной задачи, как, например, при зеленом методе синтеза.

Методом зеленого синтеза получают наночастицы металлов и их оксидов, используя безопасные материалы в качестве восстановителей и стабилизаторов солей металлов, например, продукты биологического происхождения, такие как вторичные метаболиты. Таким образом метод может осуществляться с применением экстрактов растений или их отдельных частей (корней, листьев, стеблей, цветений), а также микроорганизмов (грибов, дрожжей, бактерий) [7].

### Технология и методы исследования

В данной работе методом зеленого синтеза получали наночастицы на основе никеля. В качестве восстанавливающего и стабилизирующего агента применялся экстракт растения Дымянки лекарственной (*Fumaria officinalis*). Экстракт растения получали с использованием экстрактора Сокслета. В качестве экстрагента использовался водно-спиртовой раствор в соотношении 1:1 (вода и изопропиловый спирт). На 150 мл дистиллированной воды приходилось 25 г сушеного растения.

Для синтеза наночастиц 15 ммоль сульфата никеля 7-водной смешивались при помощи магнитной мешалки с 10 мл полученного растительного экстракта и 1 мл 2% раствора NaOH. Затем раствор помещался в УЗ-ванну, промывался, центрифугировался и сушился при 50<sup>0</sup>С. Варьировалось время сушки (Таблица 1). Пробы для измерений



готовились следующим образом: порошки наносились на стеклянную подложку и высушивались.

Таблица 1

Условия сушки образцов

№	Температура сушки, °С	Время сушки, часы
1	50	5
2		4
3		3

Морфология полученных частиц исследовалась методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием растрового электронного микроскопа Zeiss Supra25 (Carl Zeiss, Germany). Дополнительно исследовались частицы, подвергнутые ультразвуковой обработке для выделения их из агломератов.

. Картирование фотолюминесценции проводили с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа FLUOVIEW FV3000, Olympus Corporation, Japan. Регистрация проводилась на 4 каналах с длинами волн: 1 канал – 405 нм, 2 канал – 488 нм, 3 канал – 561 нм, 4 канал – 640 нм, 5 канал – «серый» цвет (ФЭУ GaAsP).

#### Результаты исследования

Опубликованные ранее в работе [8] данные РЭМ морфологии частиц приведены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что размер синтезированных агломерированных частиц лежит в диапазоне от 10 мкм до 50 мкм. После ультразвуковой обработки агломератов частиц диапазон размеров отдельных частиц составил от 40 нм до 200 нм.

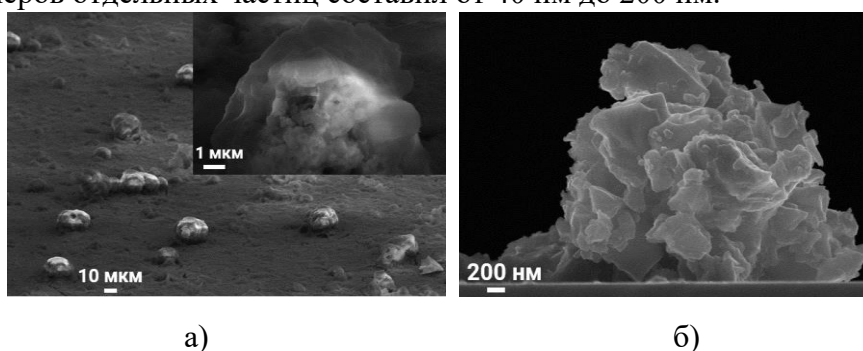


Рис. 1. РЭМ-изображения полученных частиц: а) в агломерированном виде; б) после ультразвуковой обработки [8]

Кроме того, ранее [8] нами было показано методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией (рис. 2), что частицы, сформированные в таких технологических условиях, содержат никель и оксид никеля: были обнаружены атомы Ni, Si и O, атомы загрязнений C, S и незначительные количества N, Na. Энергетическое положение Ni2p максимума до очистки составило 856 эВ, а после очистки 853.5 эВ. Положение Ni2p<sub>3/2</sub> (856 эВ) соответствует соединениям Ni, либо оксида никеля (Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), также это может быть непрореагировавшая часть соли никеля. Положение Ni2p<sub>3/2</sub> (853.5 эВ) соответствует металлическому никелю или же незначительно окисленному никелю.

Методом конфокальной микроскопии была исследована способность фотолюминесценции (ФЛ) образцов. Результаты конфокальной микроскопии представлены на рис. 3-5.

При таких условиях получения наночастиц для всех исследуемых образцов наблюдается фотолюминесценция при длинах волн 405, 561, 640 нм. В первом образце ФЛ наблюдается на поверхности образца, тогда как пористая структура затемнена. В образце №2 наблюдается схожая картина – область пор не фотолюминисцирует. В образце №3 ФЛ сильно слабее, чем у образцов №1 и 2. В работе обсуждается природа фотолюминесценции в оптической части спектра с учетом состава и микроструктуры наночастиц.

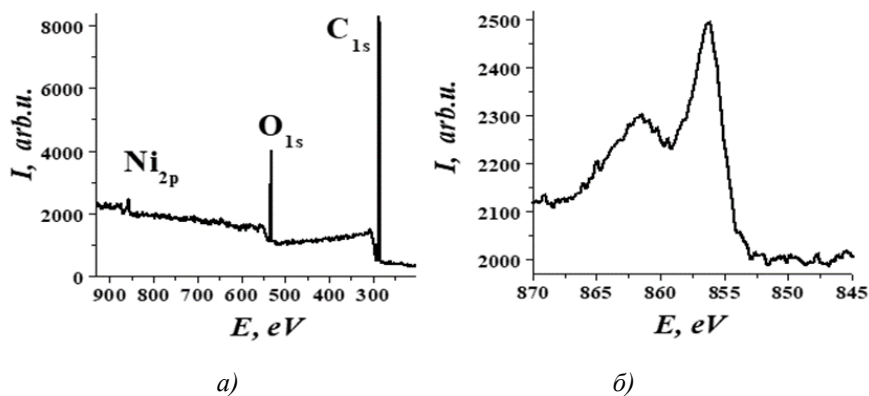


Рис. 2. а) Обзорный РФЭС-спектр поверхности полученных частиц;  
 б) Спектр РФЭС 2р-электронов никеля после очистки аргоном [8]

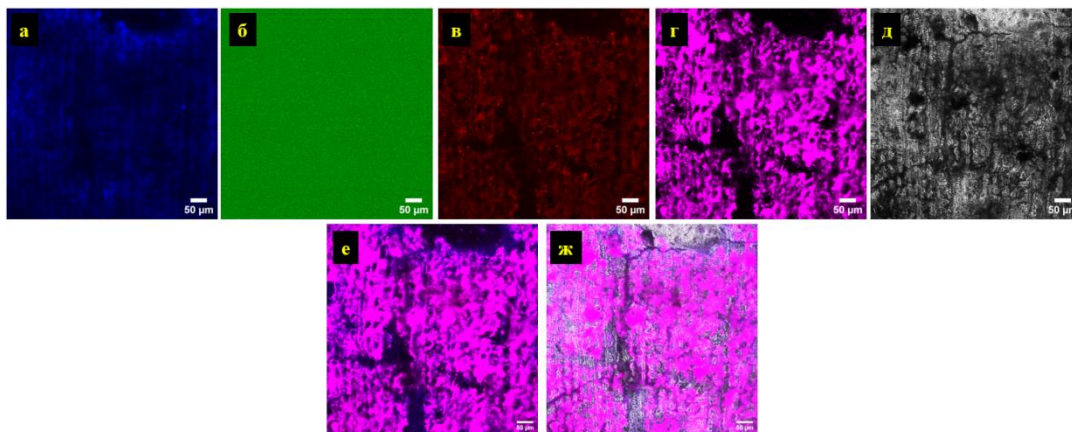


Рис. 3. Карты поверхности образца №1 в режиме отраженного света на каналах: а – 1 канал, б – 2 канал, в – 3 канал, г – 4 канал; д – 5 канал; е – объединенное изображение каналов 1, 3 и 4; ж – объединенное изображение каналов 1, 3, 4 и 5

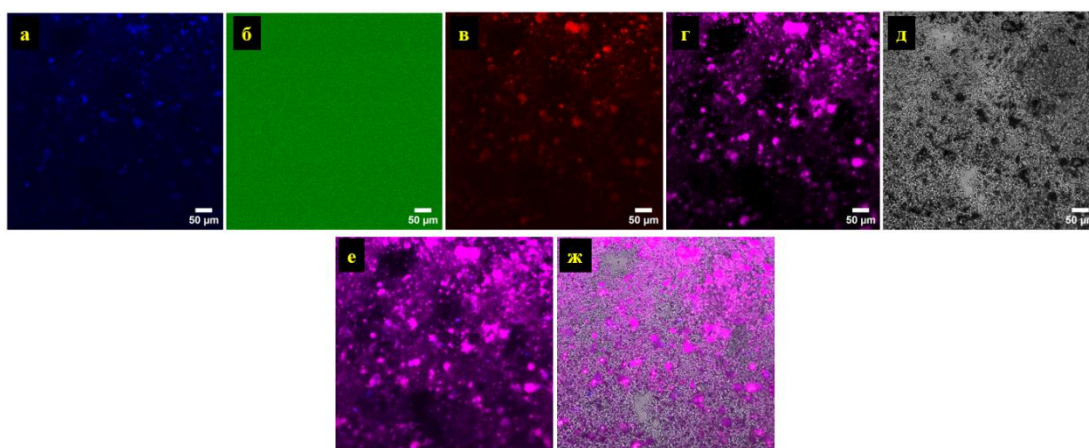


Рис. 4. Изображения поверхности образца №2 в режиме отраженного света на длинах волн: а – 1 канал, б – 2 канал, в – 3 канал, г – 4 канал; д – 5 канал; е – объединенное изображение каналов 1, 3 и 4; ж – объединенное изображение каналов 1, 3, 4 и 5.

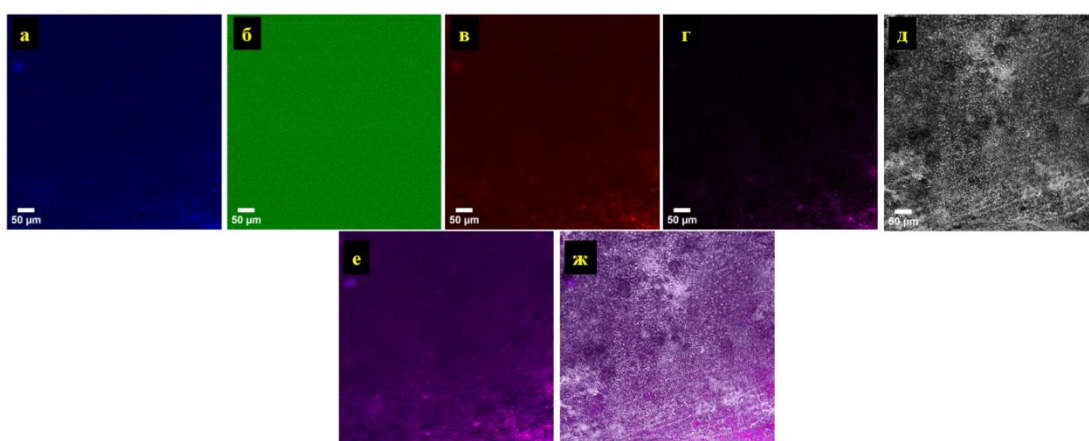


Рис. 5. Карты поверхности образца №3 в режиме отраженного света на длинах волн: а – 1 канал, б – 2 канал, в – 3 канал, г – 4 канал; д – 5 канал; е – объединенное изображение каналов 1, 3 и 4; ж – объединенное изображение каналов 1, 3, 4 и 5.

## Заключение

Получены наночастицы на основе никеля методом зеленого синтеза с применением экстракта растения Дымянки лекарственной. Наночастиц представляют собой агломераты размерами от 10 мкм до 50 мкм. После ультразвуковой обработки агломератов частиц диапазон размеров отдельных частиц составил от 40 нм до 200 нм.

Исследование конфокальным лазерным сканирующим микроскопом полученных методом зеленого синтезом наночастиц на основе никеля показало, что на поверхности образцов наблюдается отклик на длинах волн 405 нм, 561 нм и 640 нм. При этом присутствуют затемненные области на канале с серым цветом, в то время когда это же участки являются самыми интенсивными в каналах с длинами волн 405 нм, 561 нм и 640 нм.

## Список литературы

1. Шевченко В. Я. и др. Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине. – 2015.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

2. Наночастицы, наносистемы и их применение. Каталитические наносистемы / под ред. В. А. Мошникова, А. И. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. 220 с.
3. А. Ю. Гагарина и др. // Спектроскопия импеданса гибридных структур на основе наноструктурированного кремния, импрегнированного Au и NiO / Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. – 2022. – № 4. С. 2241402-1–2241402-5.
4. Samuel M. S. et al. A review on green synthesis of nanoparticles and their diverse biomedical and environmental applications //Catalysts. – 2022. – Т. 12. – №. 5. – С. 459.
5. Soboleva E. et al. Properties of porous silicon precipitated with nickel for gas sensors //Sensor Letters. – 2018. – Vol. 16. – №. 9. – P. 672-676.
6. Bobkov A. et al. Impedance Spectroscopy of Hierarchical Porous Nano-materials Based on por-Si, por-Si Incorporated by Ni and Metal Oxides for Gas Sensors //Sensors. – 2022. – Vol. 22. – №. 4. – P. 1530.
7. Singh J. et al. ‘Green’ synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation //Journal of nanobiotechnology. – 2018. – Vol. 16. – №. 1. – P. 1-24.
8. Получение наночастиц никеля методом «зеленого» синтеза / К. Халугарова, А. С. Комолов, Ю. М. Спивак [и др.] // Микроэлектроника и информатика - 2023 : Материалы научно-технической конференции, Зеленоград, 20–21 апреля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 2023. – С. 273-278.

## **МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЗУЕМОЙ ТОПОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ СОЗУ**

ХАМИТОВ К.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Современные САПР, позволяющие проектировать сложные СБИС, характеризуются универсальностью при разработке топологий СФ - блоков, однако их высокая стоимость и порог входа требуют соответствующих трудозатрат. Эти недостатки нивелируются в случаях разработки устройств, обладающих особенностями схемно-топологической реализации. Специализированные САПР, применяемые при разработке таких систем определенного узкого класса, призваны повысить эффективность процесса проектирования и моделирования, и при этом характеризуются значительно более низкой сложностью и стоимостью. В рамках данной методики представлена возможность автоматизированного проектирования параметризуемой модели одного из блоков СОЗУ, обладающей унифицированными топологическими и схемотехническими параметрами, позволяющими учесть регулярность топологии данного устройства в составе схемы памяти.

*Ключевые слова:* VLSI, SRAM, CMOS, parameterization

Оптимизация СБИС - это процесс определения оптимального расположения элементов топологии в соответствии с требуемыми характеристиками схемы. Основная сложность при этом связана с ограничениями, возникающими при трассировке соединений. Данная проблема решается в рамках метода иерархического блочного проектирования.

В методе блочного проектирования предлагается использовать не только функциональные элементы, но также специальные библиотечные элементы с различными вариантами трасс для оптимизации соединений топологии функциональных блоков. Однако эти методы оптимизации требуют предварительного понимания особенностей функционирования схемы, и при необходимости изменения параметров могут потребовать частичной или полной перестройки топологии и повторной оптимизации, что затратно и трудоемко.

Таким образом, появляется необходимость в параметризации уже оптимизированной топологии без ее полной перестройки, лишь с изменением некоторых составляющих элементов схемы для достижения новых установленных выходных параметров.

**Методика параметризации топологии** представлена на примере блока устройства предзаряда разрядных шин ячеек асинхронного СОЗУ, выполняющего функцию выравнивания заряда на линиях с большими емкостями, схема устройства представлена на рис.1(а). Однако перечисленные далее особенности необходимы для любого разрабатываемого параметризуемого блока СБИС [1]:

✓ Размеры блока должны быть унифицированы, таким образом, чтобы регулярная топология могла быть синтезирована посредством безззорного размещения соответствующих ячеек СБИС (в случае СОЗУ, самих ячеек памяти).

✓ Параметризуемый блок должен предусматривать возможность изменения ширины каналов транзисторов в соответствии с исходными данными для проектирования СБИС (в частности для схемы памяти). Причем такая параметризация должна быть неразрушающей по отношению к топологии других блоков.

✓ В состав каждого из библиотечных элементов должны входить отрезки всех линий связи, необходимых для формирования соединений в проектируемой СБИС.

Причем все отрезки соединений стыкуются автоматически при безззорном размещении элементов.

✓ Для каждого параметризуемого блока определены емкости и сопротивления каналов транзисторов и отрезков соединительных линий, что позволяет рассчитывать требуемые параметры лишь на основе исходных данных для проектирования.

Полученный, согласно требуемым условиям методики, блок топологии устройства предзаряда представлен на рис. 1(б)., при этом ширина канала транзисторов выбрана произвольной, однако топология построена таким образом, что позволяет параметризовать ширину каналов транзисторов, и соответственно изменять высоту блока, что необходимо в целях коммутации более высоких токов для быстрой перезарядки большой емкости разрядных линий.

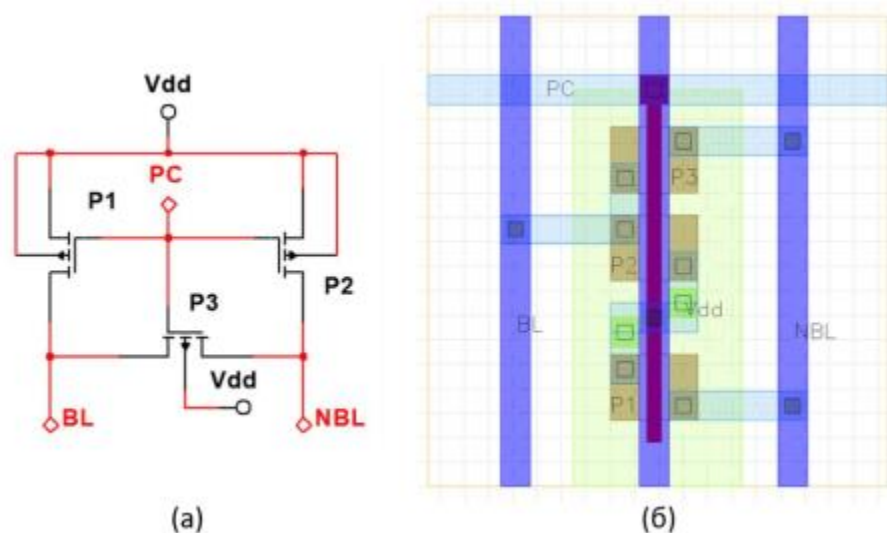


Рис. 1. Схема устройства предзаряда разрядных линий (а) и его топология (б)

**Методика расчета параметризуемых блоков** преследует основную цель – получение минимальных значений ширины каналов транзисторов, обеспечивающих установление

логического уровня на выходе устройства за допустимое время. Время перезаряда ( $t_{PC}$ ) разрядных линий, как основной параметр рассматриваемого устройства, рассчитывается исходя из законов коммутации емкостной нагрузки и физико-топологической модели МДП транзистора, что применимо и в случае расчета других, например, вентиляльных элементов [2].

Ограничившись моделью Шихмана-Ходжеса для описания работы МДПТ, можно получить следующее выражение для определения ширины каналов транзисторов (при этом необходимо отметить, что рассматривается наихудший случай, т.е. разность потенциалов между прямой линией разряда (BL) и инверсной линией разряда (NBL)  $\sim V_{dd}$ ):

$$W_P \geq \frac{\lambda}{2R_L \cdot F} \left( \sqrt{D} + Q - \frac{t_{PC}}{U} \right)$$

где  $D = \left( \frac{t_{PC}}{U} - Q \right)^2 + 4R_L \cdot A \cdot G \cdot F$ ,  $Q = R_L \cdot A + G \cdot F$ ,  $U = \ln \left( \frac{V_{dd}}{V_{dd} - \Delta V} \right)$

$t_{PC}$  - время перезаряда, за которое напряжение на разрядных шинах достигает порогового напряжения срабатывания усилителя чтения  $\Delta V$ , т.е.  $V_{BL|NBL}(t_{PC}) = \Delta V$ ,  $G$  – коэффициент, зависящий от физико-топологических параметров МДПТ:

$$G = \frac{L_g}{\mu_p C_0 \lambda (V_{dd} - |V_{th}|)}, \quad C_0 = \frac{\epsilon \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$\lambda$  - топологическая норма,  $A$  – коэффициент, зависящий от нагруженной емкости на разрядные линии (основная доля которой представляет емкость металлизации):

$$A = C_{BL|NBL_0} + C_L - W_{P_0} \sum_{i=1}^3 a_i$$

$R_L$  – полное нагрузочное сопротивление на разрядные линии;  $F = \sum_{i=1}^3 a_i$  – коэффициент,

учитывающий линейное изменение емкости;  $a_i = \frac{dC_i}{dW_{Pi}}$  – коэффициенты, учитывающие

линейное изменение емкости  $C_{BL|NBL}(W_{Pi}) = C_{BL|NBL_0} + \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^3 a_i (W_{Pi} - W_{Pi_0})$  за счет изменения ширины канала  $P_i$  транзистора соответственно.

На рис. 2 представлены расчеты в сравнении с проведенным параметрическим моделированием, при котором изменялась ширина каналов транзисторов и определялось время установления напряжения неразрушающего чтения на разрядных линиях, где в качестве нагрузочной емкости условно использовался конденсатор номиналом 1 пФ, эмулирующий разрядные шины.



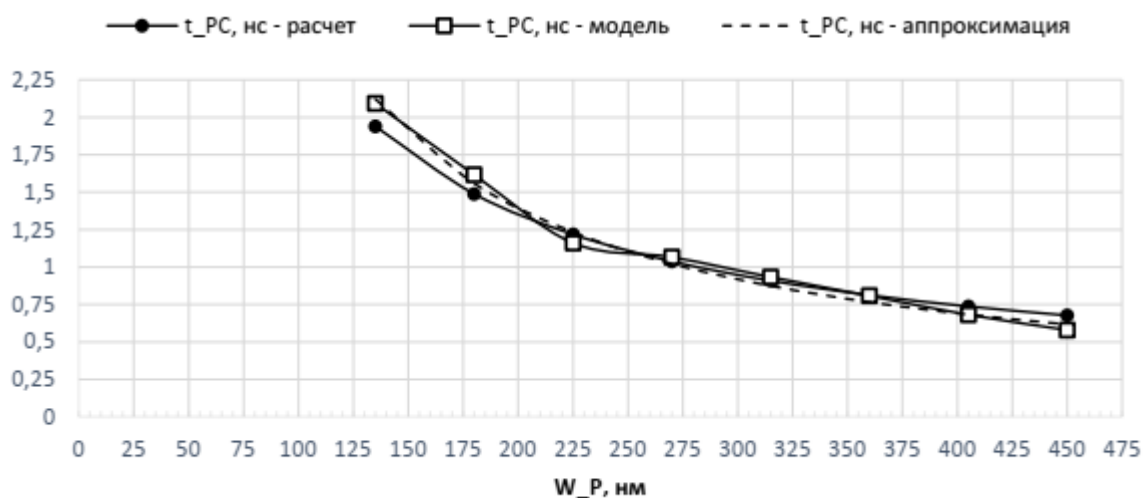


Рис. 2. Результаты параметрического моделирования и расчетов времени перезаряда разрядных линий в технологическом процессе 32 нм

Анализируя результаты, можно отметить, что значения, полученные в ходе моделирования схемы и расчета, достаточно близки. Однако для более быстрого определения времени перезаряда можно использовать следующую аппроксимацию:

$$t_{corr} = K_2 \frac{t_{calc}}{W_P^{K_1}}$$

где  $t_{corr}$  – аппроксимированное значение времени перезаряда в наносекундах;  $t_{calc}$  – рассчитанное время перезаряда по методике, приведённой ранее в наносекундах;  $W_P$  – ширина канала транзисторов P1 и P3 в нанометрах;  $K_1, K_2$  – поправочные коэффициенты:  $K_1 \cong 0.193$ ,  $K_2 \cong 2.96$ . Данные значения были подобраны с применением программы перебора значений и пересчета относительной погрешности методики расчета ( $\Delta_{calc}$ ) и аппроксимации ( $\Delta_{corr}$ ):

$$\Delta_{corr} = \left| \frac{t_{model} - t_{corr}}{t_{model}} \right| \cdot 100\%, \quad \Delta_{calc} = \left| \frac{t_{model} - t_{calc}}{t_{model}} \right| \cdot 100\%$$

где  $t_{model}$  – время перезаряда полученное в результате моделирования.

**Реализация автоматизированной параметризации** в рамках предложенной методики предусматривает следующие основные процедуры:

1. Определение координат параметризуемого элемента топологии (диффузионной области транзистора);
2. Согласно задаваемому параметру ( $t_{PC}$ ) расчет новых координат (или изменения вдоль одного из латеральных направлений);
3. Расширение элементов топологии лежащих в том же направлении параметризации;
4. Повторение процедур для других элементов в пределах блока, лежащих в параллельной параметризации направлении.

Рис.3. демонстрирует параметризацию одного из транзисторов устройства предзаряда разрядных линий на ширину  $\Delta W$ .

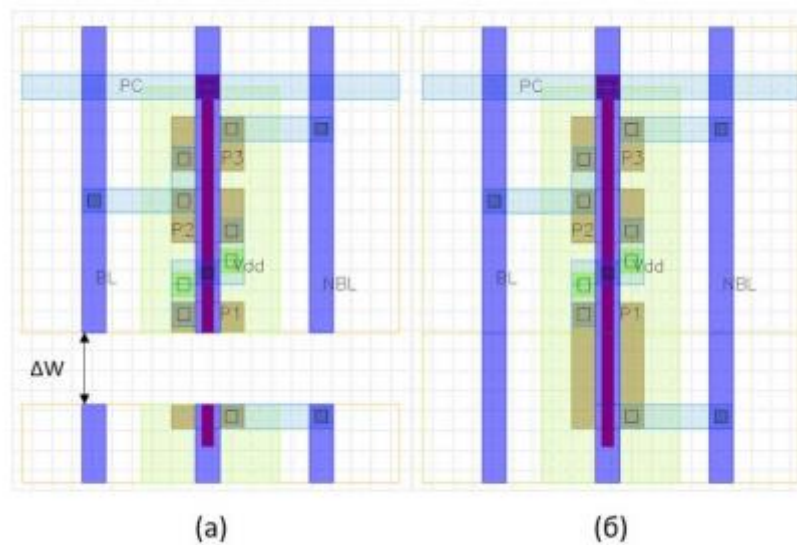


Рис. 3. Пример параметризации транзистора P1 устройства предзаряда разрядных линий, этапа расширения (а) и достраивания топологии (б)

Результатом проведенной работы является графический интерфейс, способный автоматизировать параметризацию блоков статической памяти, и позволяет получать параметризованные топологии, конвертируя их в широко используемые форматы описания топологии, такие как CIF, GDSII.

#### Список литературы

1. Рындин Е.А., Коноплев Б.Г. Субмикронные интегральные схемы: элементная база и проектирование. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. 147 с.
2. Sung-Mo Kang, Yusuf Leblebici CMOS Digital Integrated Circuits. Analysis and Design. - Second Edition изд. – 2003.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ УДАЛЕНИЯ СВЯЗУЮЩЕГО ИЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОЙ ПЕЧАТИ И PIM-ТЕХНОЛОГИЙ

ЧЕРНЫШЕВ Б.Д.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Гиредмет», Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

Ключевые слова: постоянный магнит, дебиндинг, связующее, зеленая деталь, коричневая деталь, PIM-технология, аддитивные технологии

В настоящее время методы аддитивного производства активно внедряются в существующие технологические процессы предприятий. Применение таких технологий, как послойное наплавление (FDM), стереолитография (SLA), лазерная наплавка металла (DMD) позволяет в кратчайшие сроки моделировать будущие конструкции и



изготавливать изделия сложной геометрии на основе функциональных материалов с высоким уровнем физических и механических свойств [1]. Кроме того, развиваются и совершенствуются технологии для выпуска крупносерийных партий изделий с высоким уровнем сложности конфигурации деталей. Потенциальным методом производства постоянных магнитов является технология Powder Injection Molding (PIM), которая позволяет в короткие промежутки производить большое количество деталей со сложным форм-фактором [2]. Использование данного метода позволяет контролировать микроструктуру, состав и свойства изделий на каждом технологическом этапе.

На первом этапе PIM-технологии требуется изготовить порошок, частицы которого не должны превышать 20 мкм. Далее порошки смешивают с органическими связующими, в роли которых могут выступать такие материалы, как полиоксиметилен, полиэтилен высокого давления (ПВД), полиамид, парафин и др., для получения гранулята (фидстока). Полученные гранулы высоконаполненные порошком поступают в термопласт-автомат, где происходит впрыск фидстока под давлением в пресс-форму с требуемой геометрией. Путем данной операции получают первую промежуточную деталь PIM-процесса, которая носит название «зеленая деталь». В ходе следующего этапа – дебиндинга происходит удаление большей части связующего из «зеленой детали» с образованием «коричневой детали». Следующее промежуточное изделие является более хрупким и имеет структуру открытых пор, что позволяет выполнить спекание данной детали до заданных размеров.

В ходе работы [3] для изготовления постоянных магнитов на основе сплава системы Fe-Cr-Co было использовано связующее на основе ПВД и полиоксиметилена. Применение данного типа связующего позволило получить магниты с характеристиками, уровень которых превышает свойства, установленные требования ГОСТ 24897-81. Удаление полиоксиметилена возможно только путем каталитического дебиндинга, что требует создание в ходе данной операции атмосферы паров азотной кислоты. Применение подобного реактива недопустимо в технологии производства постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов (РЗМ) ввиду активного взаимодействия порошков магнитотвердого материала с кислотой. Для решения данной задачи целесообразно использовать менее агрессивную технологию растворного удаления связующего.

Для отработки процесса растворного дебиндинга был использован порошок гексаферрита стронция. Данный материал синтезировали путем механоактивации карбоната стронция, гематита и специальных технологических добавок с последующим высокотемпературным отжигом в окислительной атмосфере [4]. Далее полученный материал просеивали и классифицировали для получения порошка с размерами частиц не более 20 мкм.

Полученный порошок смешивали с органическим связующим на основе парафина и полиамида для изготовления фидстока. Изготовление «зеленых» заготовок из гранулята высоконаполненного порошком гексаферрита стронция проводили методом инъекционного прессования на термопласт-автомате при температуре размягчения органического связующего. Дебиндинг «зеленых деталей» проводили с использованием ацетона при 60 °С и комнатной температуре. Один образец был подвергнуть термическому дебиндингу – удаление восковой составляющей связки было выполнено в засыпке глинозема в печи типа СНОЛ. Контрольное спекание «коричневых» заготовок на основе гексаферрита стронция после растворного и термического дебиндинга было выполнено в окислительной атмосфере с целью формирования однофазного состояния и магнитных свойств.

В ходе исследования кинетики удаления связующего было зафиксировано, что при использовании ацетона связка наиболее активно удалялась в первые 2 ч, что обусловлено более высокой площадью поверхности, находящейся в контакте с растворителем. Убыль массы в результате дебиндинга при обеих температурах составила 5,9 %. Изменение массы при термическом дебиндинге не было измерено, так как образец являлся более хрупким.

Внешний вид образцов, прошедших все технологические этапы метода PIM, представлен на рисунке 1.

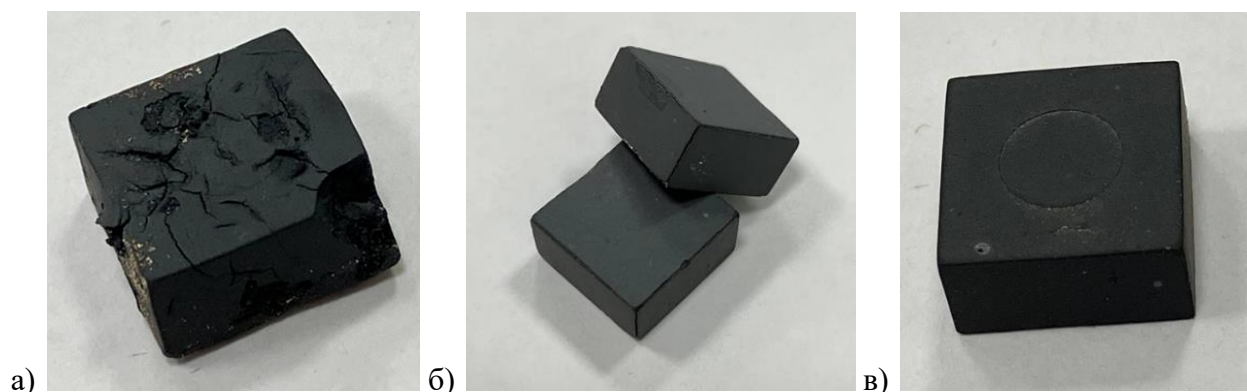


Рис. 1. Внешний вид образцов постоянных магнитов прошедших термической (а) и растворный дебиндинг при 60 °С (б) и комнатной температуре (в) после спекания

Было установлено, что применение нагрева при удалении связующего на основе парафина и полиамида ведет к увеличению скорости протекания диффузионных процессов между связкой и растворителем, что сопровождается активным выделением продуктов реакции. Это приводит к разрушению внутреннего каркаса «коричневых деталей» и последующему расслоению и растрескиванию изделий в ходе спекания.

В ходе работы установлено, что для увеличения качества изделий, получаемых методом PIM-технологии в процессе растворного дебиндинга необходимо удалять связку медленно – при температурах ниже 60 °С или без применения дополнительного нагрева.

### Список литературы

1. I.S. Gavrikov, B.D. Chernyshev, A.V. Kamynin et al. Fabrication of granulate from a Fe-Cr-Co alloy with reduced cobalt content for synthesizing permanent magnets by the MIM process. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, V. 62, № 7-8, P. 513-517.
2. С.Ю. Байдаров, А.В. Камынин, В.С. Крапошин и др. Проблемы развития MIM-технологии в России в области производства постоянных магнитов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2019 № 771, с. 34-37.
3. B. D. Chernyshev, A. V. Kamynin, E. S. Khotulev et al. A Study of the Microstructure and Magnetic Properties of Fe-Cr-Co Alloys with Reduced Content of Co obtained by the MIM Technology. *Metal Science and Heat Treatment*, 2020, № 61, p. 704-708.
4. G. González, J.R. Pargab, H.A. Moreno et al. Synthesis and characterisation of strontium hexaferrite using an electrocoagulation by-product. *Journal of chemical research*, 2016, № 40, p. 110- 114.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ $Ge_{1-x}Sn_x/Ge/Si$ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА МЕТОДОМ ФОТОМОДУЛЯЦИОННОЙ ИК ФУРЬЕСПЕКТРОСКОПИИ

ЧУМАНОВ И.В., ФИРСОВ Д.Д., КОЛЯДА Д.В., КОМКОВ О.С.

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В работе проводятся исследования спектров фотоотражения при различных температурах для образцов с эпитаксиальными слоями  $Ge_{1-x}Sn_x$ , выращенными методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке  $Ge/Si$ . Результатами эксперимента является наблюдение прямых переходов в слоях  $GeSn$  с участием зоны проводимости и подзон тяжелых и легких дырок. По величине расщепления, наблюдаемой в температурных зависимостях, показано влияние температуры образца на величину внутренних механических напряжений.

*Ключевые слова:* кремний, германий, олово, эпитаксия, гетероструктура, оптоэлектроника, полупроводники, спектроскопия, инфракрасный диапазон, фотодиод, светодиод

### Введение

В настоящее время полупроводниковые соединения на основе элементов IV группы  $Si$ ,  $Ge$  и  $\alpha-Sn$  представляют собой перспективную основу для создания оптоэлектронных гетероструктур ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона. На их основе появляется возможность создания фотоприемных и светоизлучающих приборов, что подкрепляет интерес научного сообщества к таким соединениям [1-5]. Одним из наиболее успешных среди них является  $Ge_{1-x}Sn_x$ , у которого при содержании от 6,5 до 10 % олова демонстрируется переход к прямой структуре зон [6]. На основе данного соединения уже существуют прототипы рабочих оптоэлектронных приборов [1, 3-5]. Не менее интересным является соединение  $Ge_{1-x-y}Si_xSn_y$ , в котором также возможно получения прямозонного материала и независимая регулировка величин периода решетки и ширины запрещенной зоны путем изменения состава. Среди преимуществ соединений на основе  $Si$ ,  $Ge$  и  $\alpha-Sn$  можно отметить их хорошую совместимость с кремниевой технологией, а также в сравнении с соединениями III-V групп меньшую токсичность и более низкую стоимость материалов, используемых при росте. В качестве недостатков можно отметить трудности, возникающие при росте, которые обусловлены следующими факторами: большое различие значений периодов кристаллической решетки  $\alpha-Sn$  в сравнении с  $Ge$  (15 %) и  $Si$  (17 %); низкая растворимость олова в германии (в твердой фазе); сегрегация олова на поверхности при высоком его содержании в составе. Применение метода низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) позволяет значительно улучшить качество эпитаксиальных структур на основе рассматриваемых соединений [7].

### Описание эксперимента

В ходе работы исследовались гетероструктуры с эпитаксиальными слоями на основе кремния, германия и серого олова. Рост структур выполнялся методом низкотемпературной МЛЭ на кремниевой подложке (100). Изначально был выращен буферный слой кремния толщиной 100 нм, следом идет 10 нм вставка из твердого раствора  $Ge_{0.3}Si_{0.7}$ , на которой формируется германиевая виртуальная подложка толщиной 200 нм. Поверх виртуальной подложки выращивались слои  $Ge_{0.918}Sn_{0.082}$  (образец А) и  $Ge_{0.92}Sn_{0.08}$  (образец В).

Для исследования параметров зонной структуры данных эпитаксиальных слоев был задействован метод фотомодуляционной ИК фурье-спектроскопии [8]. Исследовательская установка включала в себя ИК фурье-спектрометр Vertex 80 в совокупности с фотодетектором InSb (с азотным охлаждением), синхронный усилитель SR-830 и диодный лазер с длиной волны 405 нм и мощностью до 200 мВт, который модулировался механически с частотой 2,3 кГц. Для фазовой коррекции при преобразовании измеряемого сигнала в спектры и выполнения их анализа использовались методики из работ [9,10].

### Обсуждение результатов

В ходе работы были получены спектры фототражения от образцов в диапазоне температур 11-140 К. На рис. 1 приведены спектры для образца с эпитаксиальным слоем, содержащим 8,2 % серого олова, (образец А), на котором отмечены положения энергии наблюдаемых межзонных переходов. Пики с высокой энергией, расположенные на правой части спектра, принадлежат прямым переходам в Ge виртуальной подложке. Пики с низкой энергией демонстрируют прямые переходы в эпитаксиальном слое  $\text{Ge}_{0.918}\text{Sn}_{0.082}$ .

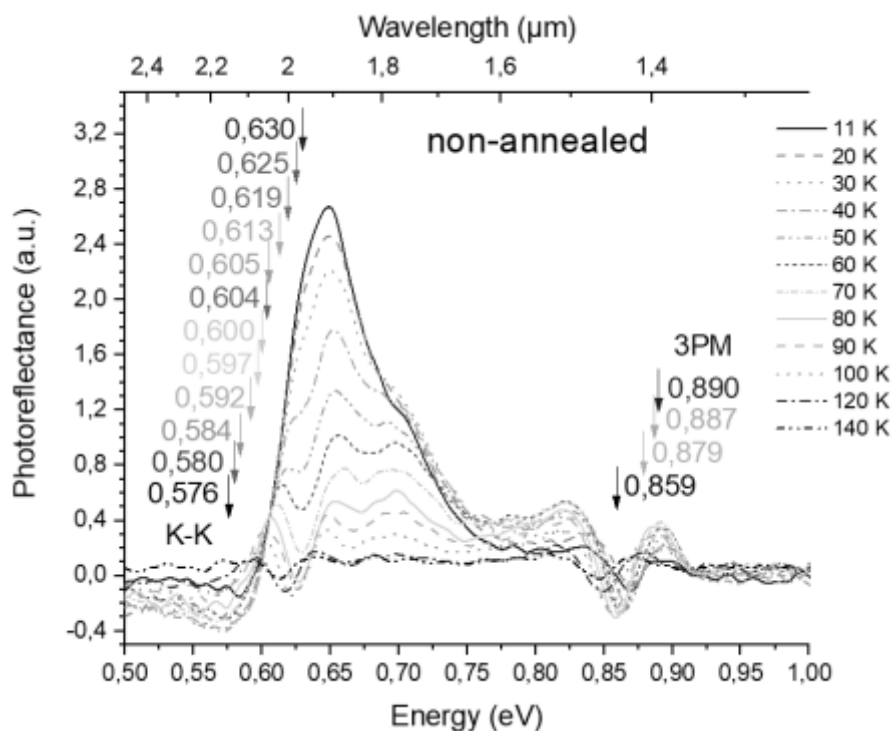


Рис. 1. Спектры фототражения образца А в диапазоне температур 11-140 К

Рассматривая поведения данного пика с ростом температуры, можно отметить его медленное расщепление на два отдельных экстремума. Вероятно, такое поведение может быть связано с присутствием механических напряжений в структуре, поскольку верхний эпитаксиальный слой с оловом будет иметь период кристаллической решетки, превышающий таковые у германия и кремния, следовательно, имеют место напряжения сжатия. Метод рентгеновской дифрактометрии показал значение степени релаксации эпитаксиального слоя относительно кремниевой подложки на 72 %, что подтверждает наличие остаточных механических напряжений.

На рис. 2 проводится сравнение экспериментально полученных зависимостей с расчетами на основе данных из литературы [11-15]. Справа представлена температурная зависимость энергии прямых переходов в слое виртуальной подложки из германия, для которой была проведена аппроксимация уравнением Варшни. Хорошее совпадение экспериментальной зависимости с расчетом на основе параметров из литературы демонстрирует точность применяемого метода исследования.

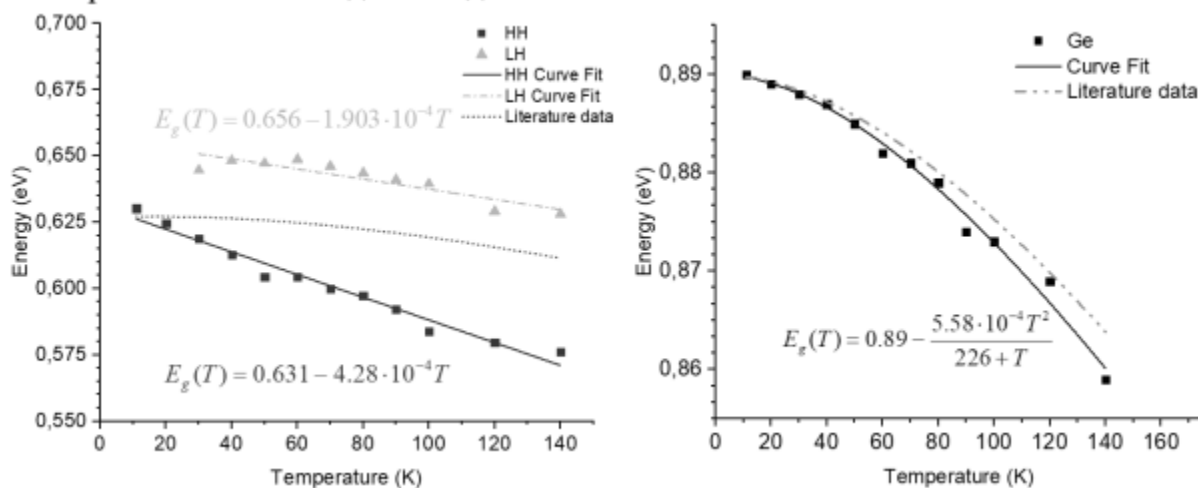


Рис. 2. Температурные зависимости энергии прямых переходов в  $Ge_{0.918}Sn_{0.082}$  (слева) и  $Ge$  (справа)

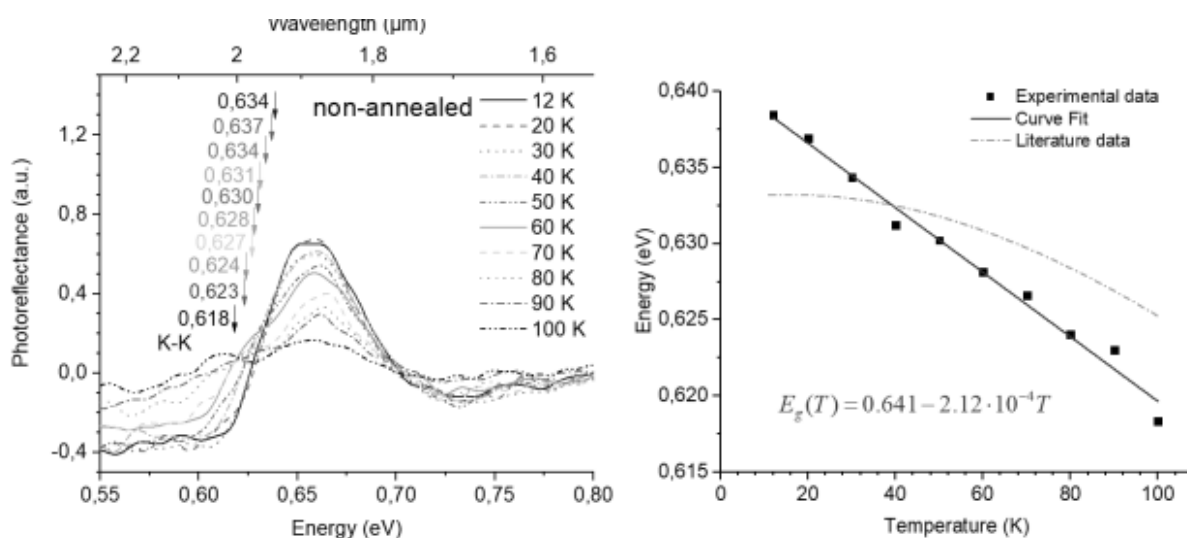


Рис. 3. Спектры (слева) и температурная зависимость прямых переходов (справа) в  $Ge_{0.92}Sn_{0.08}$

На графике слева (рис. 2) представлены зависимости положения каждого из пиков в зависимости от температуры, для которых были выполнены линейные аппроксимации. При температуре 11 К, когда два близко расположенных пика сливались в единый, величина механических напряжений в структуре была минимальной. Это также подтверждается совпадением экспериментальных данных с расчетом из литературы для данного состава при указанной температуре. При нагреве образца наблюдается все большее различие в энергии между двумя зависимостями. Вероятной причиной этого может быть увеличение внутренних механических напряжений в структуре в ходе нагрева

образца, что приводит к снятию вырождения по энергии подзон легких и тяжелых дырок в валентной зоне. Следовательно, по этой же причине наблюдается отдаление эксперимента от кривой на основе расчета из литературы.

Аналогичное исследование было проделано для образца с 8 % содержанием олова в верхнем эпитаксиальном слое (образец В). На рис. 3 слева показаны спектры в диапазоне температур 11-100 К, где наблюдается один выраженный пик, принадлежащий энергии прямых переходов в эпитаксиальном слое GeSn.

На температурной зависимости справа (рис. 3) приводится сопоставление аппроксимации эксперимента и расчета зависимости энергии прямых переходов от температуры для состава  $\text{Ge}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$ . По достаточно близкому расположению двух зависимостей можно судить о наличии слабых механических напряжений в структуре.

### **Заключение**

В работе продемонстрированы результаты исследования образцов с эпитаксиальными слоями  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ . В ходе эксперимента при повышении температуры наблюдалось раздвоение пика, соответствующего прямым переходам в данном материале. Наблюдаемое поведение сопоставлено с расчетами на основе данных из литературы и результатами метода рентгеновской дифрактометрии. В результате сделан вывод о влиянии внутренних механических напряжений в эпитаксиальном слое структуры на энергии прямых переходов.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность Скворцову И.В., Машанову В.И. и Тимофееву В.А. из ИФП СО РАН за предоставление образцов для исследований.

### **Список литературы**

1. Oehme M., Schmid M., Kaschel M., Gollhofer M., Widmann D., Kasper E., Schulze J. GeSn p-i-n detectors integrated on Si with up to 4% Sn // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 101, № 14.
2. Sun G., Soref, R. A., Khurgin J. B., Yu S. Q., Chang G. E. Longwave IR lattice matched L-valley Ge/GeSiSn waveguide quantum cascade detector // *Optics Express*. 2022. Vol. 30, № 23. P. 42385.
3. Wilson T. et al. Single and multi-junction solar cells utilizing a 1.0 eV SiGeSn junction // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1766, № 1.
4. Zhou Y., Dou W., Du W., Pham T., Ghetmiri S. A., Al-Kabi S., Mosleh A., Alher M., Margetis J., Tolle J., Sun G., Soref R., Li B., Mortazavi M., Naseem H., Yu S. Q. Systematic study of GeSn heterostructure-based lightemitting diodes towards mid-infrared applications // *Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 120, № 2.
5. Zhou Y., Ojo S., Wu C. W., Miao Y., Tran H., Grant J. M., Abernathy G., Amoah S., Bass J., Salamo G., Du W., Chang G. E., Liu J., Margetis J., Tolle J., Zhang Y. H., Sun G., Soref R. A., Li B., Yu S. Q. Electrically injected GeSn lasers with peak wavelength up to 2.7  $\mu\text{m}$  // *Photonics Research*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 222.
6. Kolyada D. V., Firsov D. D., Timofeev V. A., Mashanov V. I., Karaborchev A. A., Komkov O. S. Investigation of the effect of annealing and composition on infrared photoluminescence of GeSiSn/Si multiple quantum well nanoheterostructures // *Semiconductors*. 2022. Vol. 56, № 8.
7. Moontragoon P., Ikonić Z., Harrison P. Band structure calculations of Si-Ge-Sn alloys: achieving direct band gap materials // *Semiconductor Science and Technology*. 2007. Vol. 22, № 7. P. 742–748.
8. Комков О. С. Инфракрасное фотоотражение полупроводниковых материалов АЗВ5 (Обзор) // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63, № 8. С. 991-1014.
9. Фирсов Д. Д., Комков О. С., Фотомодуляционная И. К. фурье-спектроскопия полупроводниковых структур: особенности фазовой коррекции и применение метода // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, № 23. С. 87-94.
10. Hosea T.J.C. Estimating Critical-Point Parameters of Modulated Reflectance Spectra // *Physica Status Solidi. B, Basic Research*. 1995. Vol. 189, № 2. P. 531–542.
11. Moontragoon P., Soref R.A., Ikonic Z. The direct and indirect bandgaps of unstrained  $\text{SixGe}_{1-x}\text{ySny}$  and their photonic device applications // *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112, № 7.

12. Chen R., Lin H., Huo Y., Hitzman C., Kamins T. I., Harris J. S. Increased photoluminescence of strain-reduced, high-Sn composition Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> alloys grown by molecular beam epitaxy // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99, № 18.

13. Gupta S., Magyari-Köpe B., Nishi Y., Saraswat K. C. Achieving direct band gap in germanium through integration of Sn alloying and external strain // Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 113, № 7.

14. Bertrand M., Thai Q.-M., Chrétien J., Pauc N., Aubin J., Milord L., Gassenq A., Hartmann J.-M., Chelnokov A., Calvo V., Reboud V. Experimental calibration of SN-Related varshni parameters for high SN content GESN layers // Annalen Der Physik. 2019. Vol. 531, № 6.

15. Adachi S. Handbook on physical properties of semiconductors. // Springer Science & Business Media, 2004.

## ВЛИЯНИЕ СВЧ ОБРАБОТКИ НА ЯРКОСТНО-СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЦИНКСУЛЬФИДНЫХ РАДИОЛЮМИНОФОРОВ

ШВИНДИН М.А., БАХМЕТЬЕВ В.В., ЗЕЛЕНИНА Е.В.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический Университет)*

**Аннотация.** В ходе работы было изучено влияние обработки в СВЧ-поле на фазовый состав и спектрально-яркостные характеристики цинксульфидного катодолуминофора марки P31-G1A при возбуждении β-излучением трития. Обнаружена возможность направленного регулирования фазового состава люминофора путем воздействия СВЧ-поля, в частности, образование большого количества вюрцита ниже температуры фазового перехода. Была установлена корреляция между изменением фазового состава и светотехническими характеристиками радиолуминофора.

*Ключевые слова:* радиолуминесценция, сульфид цинка, сфалерит, вюрцит, тритий, СВЧ-обработка

Радиолуминесцентные источники света (РИС) широко используются в качестве автономной подсветки, не требующей источника электроэнергии, в наручных часах, маркерах и брелоках, а также в виде тактических световых вставок для огнестрельного оружия, которые заметно повышают эффективность стрельбы в ночное время. В настоящее время основной технологией РИС являются газонаполненные трубки, покрытые с внутренней стороны слоем люминофора и заполненных тритием.

Однако у них невысокая яркость свечения, обусловленная самопоглощением трития в газовой среде и поверхностным свечением по площади стеклянной трубки, а также у них хрупкая конструкция. Для устранения этих недостатков предлагается использовать твердотельные источники вместо газовых. Тритий, связываясь в твердотельной матрице в виде тритида титана, является более безопасным, чем тритиевый газ. Улучшение характеристик твердотельных источников без увеличения активности радиоизотопа возможно через использование различных способов энергетического воздействия на кристаллическую структуру люминофора. К ним относятся электронно-лучевое модифицирование [1-3], обработка в низкотемпературной плазме [4-6], а также электромагнитным полем СВЧ диапазона и т.д. Эти методы способствуют образованию новых точечных дефектов в виде вакансий, а также стимулируют диффузию активатора и соактиватора вглубь решётки основы, равномерно распределяя легирующие примеси по всему объёму кристаллического зерна люминофора. Это, в свою очередь, обеспечивает образование новых центров люминесценции и повышает яркость свечения.

В прошлой работе [7] было показано благотворное влияние СВЧ поля на яркость фотолуминесценции люминофора на основе  $Zr_{0,95-x}Y_{0,05}O_2:xEu^{3+}$  ( $x=0,01-0,15$ ), который выступает в качестве перспективной «красной» компоненты светодиодных источников

света. Согласно полученным результатам, рост яркости составил более 70% по сравнению с промышленным люминофором  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  красного свечения. Авторы объясняют это изменением фазового состава после обработки, которое заключается в исчезновении примесей моноклинной фазы  $ZrO_2$  и увеличении выхода основной кубической фазы  $ZrO_2$ .

Однако для радиолюминесцентных источников света предпочтительно использование люминофоров зелёно-жёлтого цвета свечения в диапазоне 520-570 нм, т.к. данный диапазон находится вблизи максимума спектральной чувствительности человеческого глаза, поэтому они будут выглядеть ярче при одинаковой интенсивности излучения.

В данной работе была испробована методика обработки СВЧ полем промышленного катодолуминофора марки P31-G1A на основе ZnS с зелёным цветом свечения. Обработка проходила в кварцевых тиглях малого объёма с использованием углеграфитового войлока между верхним и нижним слоем активированного угля, который необходим для создания восстановительной атмосферы, препятствующей возможному образованию оксида цинка. Слой люминофора располагался в центральной части тигля. После чего готовый тигель загружали в ёмкость из волокнистого корунда, а затем ставили в печь и контролировали температуру нагрева с помощью пирометра марки Кварц-М. Частота магнетрона печи – 2400 МГц. Температура нагрева в печи удерживалась на уровне 650 °С. Время обработки составляло 5, 15 и 20 минут.

Возбуждение радиолюминесценции проводили на тритиевом  $\beta$  – источнике, представляющие собой подложку с напылённым слоем титанового порошка. Толщина слоя составляла 0,5 мкм, площадь источника - 1 см<sup>2</sup>, активность - 0,4 Ки. Яркость радиолюминесценции измерялась с помощью радиометра IL1700. Спектры радиолюминесценции были измерены при помощи спектрофлуориметра Solar CM 2203. Рентгенофазовый анализ выполнен на рентгеновском дифрактометре Bruker D8-Advance с предварительной обработкой спектров в программе DIFRAC.EVA V5.0.

Было обнаружено, что после обработки во всех случаях независимо от времени обработки основная шихта люминофора разделялась на 2 компонента, по-разному люминесцирующие в УФ-области. Наиболее плотная сердцевина, образовавшаяся из-за сильного спекания порошка, люминесцирует в «синей» области, а окружающий её рыхлый слой, соответственно в «зелёной», как и исходный образец, не подвергавшийся обработке. Обе компонента люминофора были отделены друг от друга и измельчены. Для них были сняты спектры и яркости радиолюминесценции, а также проведён рентгенофазовый анализ (РФА) с последующей обработкой дифрактограмм методом Ритвельда для установления процентного содержания кристаллических фаз.

На рисунке 1 представлены результаты измерений спектров радиолюминесценции для всех образцов с разным временем обработки и разделённых на две компонента. Можно видеть, что практически для всех образцов после облучения наблюдается значительное снижение интенсивности радиолюминесценции на длине волны максимума 524 нм по сравнению с исходным люминофором, не подвергавшемуся обработке. Данной полосе люминесценции могут соответствовать такие ассоциативные центры свечения как атом меди в узле цинка вместе с ионом галогена узле серы ( $Cu_{Zn'} Hal_s^\bullet$ ). К тому же для образовавшихся «синих» компонент наблюдается сдвиг максимума в коротковолновую область, а также сильное увеличение вклада «синей» полосы на 450 нм в спектр излучения, которой могут соответствовать такие центры как ассоциаты меди в узле цинка вместе с медью в междоузлии ( $Cu_{Zn'} Cu_i^\bullet$ ).



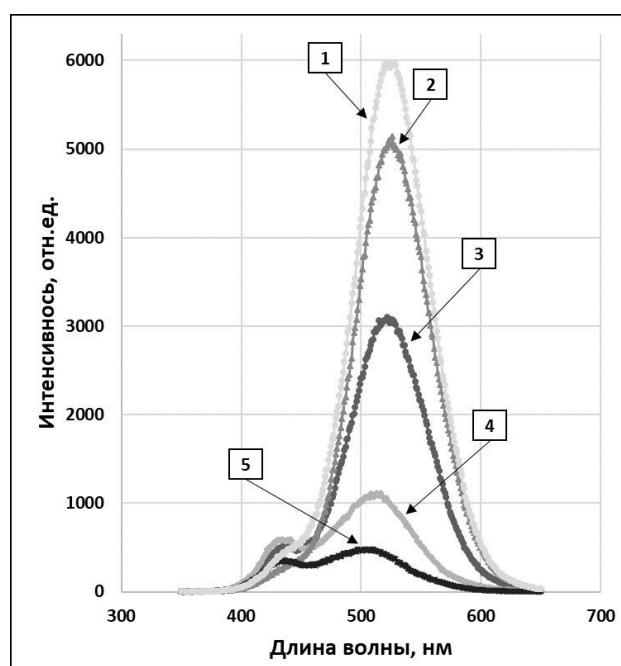


Рис. 1. Спектры радиолоюминесценции образцов катодолюминофора марки P31-G1A после СВЧ-обработки с разным временем облучения: 1 - P-31 исх.; 2 - 15 мин. P-31 зел.; 3 - 5 мин. P-31 зел.; 4 - 5 мин. P-31 син.; 5 - 15 мин. P-31 син.

Согласно результатам рентгенофазового анализа (РФА) с последующей обработкой дифрактограмм методом Ритвельда, после СВЧ-обработки происходят значительные изменения в фазовом составе образовавшихся образцов. Исходный образец люминофора, который не подвергался обработке, на 100% представлен сфалеритом (кубическая модификация ZnS). После же обработки во всех образцах обнаруживается вюрцит (гексагональная модификация ZnS) в больших количествах. Образовавшаяся «зелёная» компонента представлена сфалеритом с небольшими включениями вюрцитной фазы (2% и 13% для 15 и 20 минут облучения соответственно). Однако «синяя» компонента полностью переходит в вюрцит на 100 % после 15 и 20 минут обработки в СВЧ-поле. Стоит отметить, что для фазового перехода сфалерит-вюрцит в муфельной печи необходима температура в 1100 °С, в нашем же случае температура составляла около 650 °С.

На основании полученных данных была построена зависимость яркости, суммарной интенсивности радиолоюминесценции, а также вклада «зелёной» полосы на 524 нм в общий спектр излучения от процентного содержания вюрцита в образцах, которая представлена на рисунке 2. Хорошо видно, что чем выше содержание вюрцита, тем меньше в целом яркость и интенсивность катодолюминофора P31-G1A. Данная экспериментальная зависимость носит нелинейный характер и может хорошо аппроксимироваться экспоненциальным уравнением, что говорит о резком ухудшении свойств люминофора при увеличении доли вюрцита.

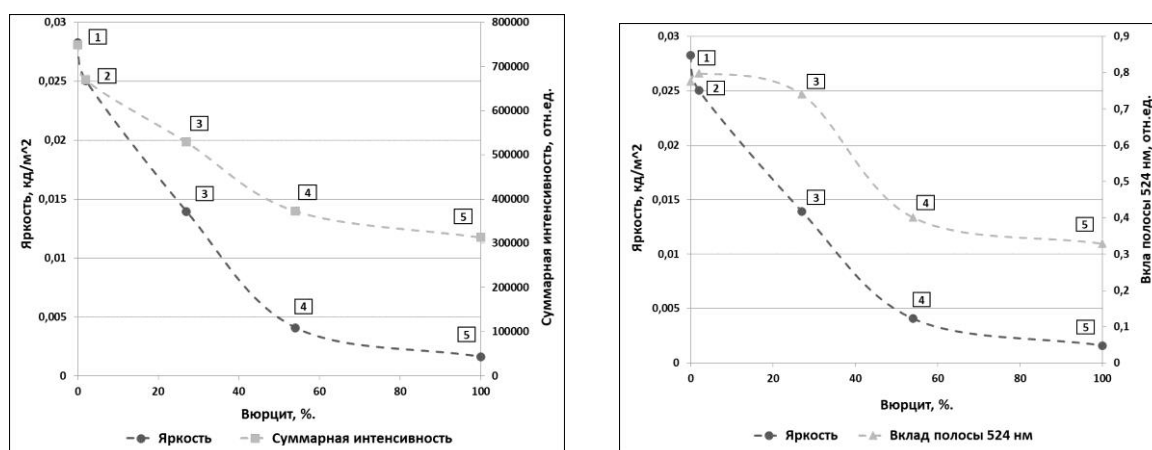


Рис. 2. Зависимость яркости, суммарной интенсивности радиolumинесценции и вклада «зелёной» полосы на 524 нм от содержания вюрцита в образцах после СВЧ-обработки: 1 - P-31 исх.; 2 - 15 мин. P-31 зел.; 3 - 5 мин. P-31 зел.; 4 - 5 мин. P-31 син.; 5 - 15 мин. P-31 син.

Таким образом, в результате проделанной работы показана возможность направленного регулирования фазового состава цинк-сульфидных люминофоров путём их СВЧ-обработки и получения вюрцитной фазы при температуре 650 °С. Поскольку для люминофора P31-G1A, имеющего состав ZnS:Cu наличие вюрцитной фазы нежелательно, дальнейшие исследования будут направлены на поиск эффективных катодо(радио)люминофоров, которые изначально состоят из вюрцита, т.к. вполне возможно, что обработка в СВЧ-поле для них будет иметь обратный эффект и приведёт к повышению яркости радиolumинесценции.

### Список литературы

1. Bakhmetyev V.V., Zelenina E.V., Shvindin M.A. Synthesis of ZnS:Cu,Br radioluminescent phosphors using the electron-beam treatment and studying their characteristics // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 2056 (2021). 012047.
2. Zelenina E.V., Bakhmetyev V.V., Sychov M.M., Shvindin M.A. Synthesis and Electron-Beam Modification of Zinc-Sulphide Phosphors for Solid-State Radioluminescent Light Sources (SRLS) // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1040. PP. 35–40.
3. Sychov M.M., Mjakin S.V., Nakanishi Y., Korsakov V.G., Vasiljeva I.V., Bakhmetjev V.V., Solovjeva O.V., Komarov E.V. Study of active surface centers in electroluminescent ZnS:Cu,Cl phosphors // Applied Surface Science. 2005. 244 (2005). PP. 461–464.
4. Огурцов К.А., Сычев М.М., Бахметьев В.В., Минакова Т.С., Стрига Н.С., Стрига Ю.С., Ерузин А.А., Гринштейн И.Л., Хрипун А.В., Землянкина А.С. Влияние плазмохимического модифицирования на электрооптические и поверхностные свойства цинк-сульфидных электролюминофоров // Журнал прикладной химии. 2012. Т. 85. Вып. 12. С. 1957–1963.
5. Sychov M., Ogurtsov K., Ponyaev A., Nakanishi Y., Kominami H., Hara K., Mimura H. Plasmachemical modification effect on luminescence of AIBVI phosphors // Journal of Luminescence. 2014. 156 (2014). PP. 69–73.
6. Кескинова М.В., Константинова Д.А., Мякин С.В., Федоренко Н.Ю., Сычев М.М. Сравнительное исследование люминофоров в системе  $ZrO_2-Y_2O_3-Eu_2O_3$ , полученных методами мокрого смешения и совместного осаждения с последующей СВЧ-обработкой // Физика и Химия стекла. 2021. Т. 47. № 1. С. 93–99.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА

ШЕВЧЕНКО С.А., ОСЕЛКОВ Г.С., ИВАНОВ Б.В., СМИРНОВ А.А.

*СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Проведено моделирование генератора импульсов субнаносекундной длительности с индуктивным накопителем энергии на основе диода с накоплением заряда. Выявлены оптимальные режимы работы схемы генератора для получения импульсов напряжения с наилучшими амплитудно-временными параметрами. Получены импульсы напряжения с амплитудой до 45 В при длительности переднего фронта 145 пс.

*Ключевые слова:* генератор СКИ, ДНЗ, сверхширокополосные сигналы

### **Введение**

Сверхширокополосные сигналы обладают рядом преимуществ по сравнению с гармоническими сигналами, в частности обладают высокой информационной емкостью, помехозащищенностью, обеспечивают совместимость передачи информации с измерением параметров движения объекта, что позволяет применять их в устройствах радиолокации [1], медицинской диагностики и контроля за состоянием пациентов в клиниках [2-3], идентификации [4] и точного позиционирования [5]. В отдельную группу применений выделяют сверхширокополосные технологии радиосвязи – разрабатываемый еще с середины прошлого века способ обмена информацией, главной особенностью которого является отсутствие несущей. Так, информация передается с помощью коротких импульсов нано- и субнаносекундной длительности, обладающих широким спектром и малой спектральной плотностью мощности.

Проблема создания СШП-устройств для короткоимпульсной радиосвязи упирается в необходимость разработки генераторов сверхкоротких импульсов напряжения. В настоящее время подобные генераторы создаются на основе логических элементов по КМОП-технологии [6], известны способы формирования импульсов с использованием линий задержки [7]. Недостатком таких схем являются малые частоты повторения импульсов, а также малые генерируемые мощности, что существенно ограничивает дальность действия СШП-устройств. Такого недостатка лишены генераторы сверхкоротких импульсов с индуктивным накоплением энергии на основе дрейфовых диодов с резким восстановлением [8], в которых амплитудно-временные параметры генерируемых импульсов (импульсная мощность, длительность переднего фронта импульса и его длительность на полувысоте, частота следования импульсов) определяются, в основном, параметрами диода. Известно, что с помощью таких схем возможно формирование импульсов с амплитудами, варьирующимися в пределах от единиц вольт [9] до десятков киловольт [10] при длительностях переднего фронта 100...500 пс. Недостатком указанных генераторов является ряд специфических требований к внутренней структуре диода для обеспечения необходимого быстродействия, что затрудняет применение коммерчески доступных диодов в силу неопределенности их амплитудно-временных параметров в импульсном режиме работы.

Настоящее исследование посвящено расчету и проектированию генератора СКИ с индуктивным накоплением энергии. Требования к импульсу приведены в таблице 1. Исследование проводилось методом математического моделирования в среде SPICE.

Таблица 1

**Требования к амплитудно-временным параметрам генерируемых импульсов**

Параметр	Значение
Форма импульса	Колоколообразная или близкая к ней
Амплитуда импульса	10...50 В
Длительность переднего фронта	125 пс
Длительность на полувысоте	500 пс
Период следования импульсов	до 200 нс

**Принцип работы генератора**

Принцип работы генератора с индуктивным накопителем основывается на инерционности процессов рассасывания неосновных носителей заряда, накапливаемых в структуре диода с *p-n* переходом при пропускании через него импульса прямого тока. Так, при пропускании тока через диод неосновные носители заряда накапливаются в *p-n* переходе, тогда как при подаче обратного напряжения, диод в течение некоторого времени *ТТ* сохраняет проводящее состояние за счет выноса накопленных носителей обратным током. По окончании выноса неосновных носителей, происходит вынос основных носителей заряда, что сопровождается расширением ОПЗ в *p-n* переходе, и переходом диода в непроводящее состояние. Указанный диод должен обладать высоким значением допустимого импульсного прямого тока и малым временем рассасывания накопленного заряда.

Схема генератора, рассматриваемая в настоящей работе, приводится на рисунке 1. Основой генератора является колебательный контур, период колебаний в котором должен приблизительно равняться удвоенному времени выноса накопленного заряда *ТТ*. Основной колебательный контур, включающий в себя конденсатор  $C_{разд}$ ,  $C$ ,  $L$ , ограничительный резистор  $R_{огр}$  и сопротивление нагрузки  $Z_{тракта}$ , настроен на аperiодический режим работы. Ограничительный резистор позволяет исключить из схемы ключ управления питанием, так как в момент генерация импульса резистор ограничивает ток, идущий от источника питания через управляемый ключ  $K$ .

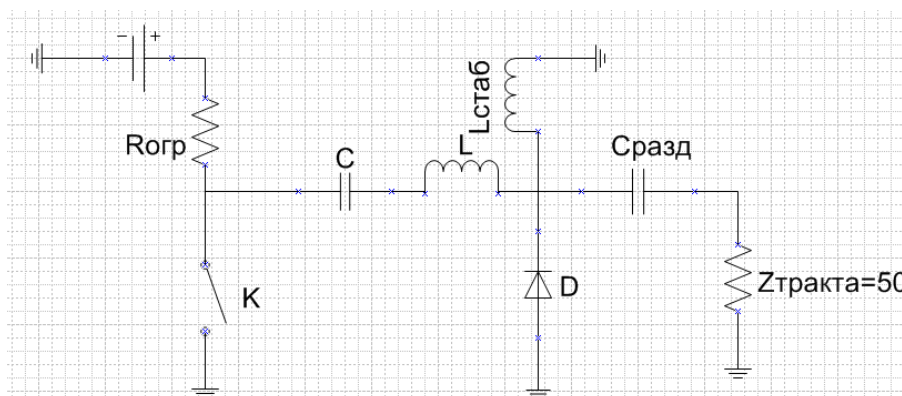


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

В схеме на рисунке 1 ветви цепи  $C-K-D-L$  образуют собственный контур  $LC$ ,  $R_{огр}-C-L-C_{разд}-Z_{тракта}$  – основной контур,  $K-C-L-C_{разд}-Z_{тракта}$  – рабочий контур,  $L_{стаб}-C_{разд}-Z_{тракта}$  – контур стабилизации напряжения в сигнальной точке.

В заданный момент времени, когда емкость  $C$  заряжена до напряжения источника питания, замыкается ключ  $K$ , который пропускает через себя сумму тока источника питания, и ток колебания собственного контура. В момент окончания рассасывания накопленных носителей ток через индуктивность  $L$  максимален и является обратным током для диода  $D$ . Таким образом, накопленные носители выводятся максимальным током, что сопровождается резким ростом напряжения на диоде со скоростью его перехода в непроводящее состояние. Очевидно, при этом, что ЭДС на индуктивности будет тем больше, чем быстрее переключается диод. Для разрядки разделительного конденсатора  $C_{\text{разд}}$  применяется дополнительная индуктивность  $L_{\text{стаб}}$ .

При расчетах использовалась SPICE-модель коммерчески доступного диода 1N4148 фирмы OnSemi, при этом ключ  $K$  принимался идеальным и не обладал инерционностью процесса переключения. Расчетная осциллограмма одиночного импульса на нагрузке  $Z_{\text{тракта}} = 50 \text{ Ом}$  приводится на рисунке 2.

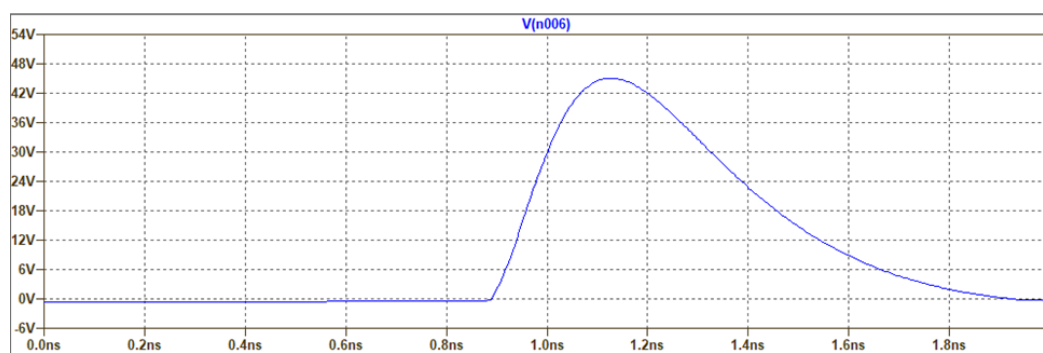


Рис. 2. Расчетная осциллограмма импульса на нагрузке

Путем варьирования номиналов элементов схемы получена такая их комбинация, при которой амплитуда сформированного импульса составила  $U_{\text{max}} = 45 \text{ В}$ , длительность переднего фронта  $t_{\text{фр}} = 145 \text{ пс}$ ,  $t_{0,5U_{\text{max}}} = 425 \text{ пс}$ .

Модель схемы была также уточнена путем учета переходных процессов в ключе  $K$ : в роли управляемого ключа использовалась SPICE-модель полевого транзистора, время включения и выключения которого варьировалось в пределах  $10 \dots 30 \text{ нс}$  в зависимости от величины управляющего напряжения. Ограничительный резистор  $R_{\text{огр}}$ , помимо ограничения тока источника питания, также определяет время зарядки основного конденсатора  $C$ , с помощью чего возможно управление режимом ввода и вывода неравновесного заряда в диоде.

Разделительный конденсатор  $C_{\text{разд}}$  и нагрузка  $Z_{\text{тракта}}$  образуют интегрирующую цепь, которая накапливает напряжение с постоянной времени много больше, чем период следования импульсов, в результате чего амплитуда импульсов на нагрузке оказывается нестабильной. Стабилизирующая индуктивность  $L_{\text{стаб}}$  частично компенсирует этот эффект. Так, индуктивность  $L_{\text{стаб}}$  вместе с разделительным конденсатором и сопротивлением нагрузки, образуют разряжающий контур, работающий в апериодическом режиме, что позволяет разряжать разделительный конденсатор перед следующим импульсом.

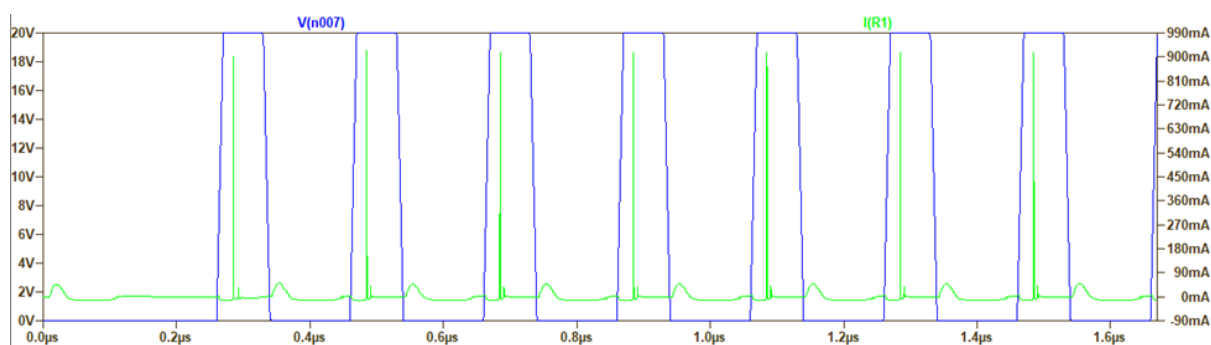


Рис. 3. График взаимного расположения управляющего импульса (синяя кривая по левой оси) и импульсов тока на нагрузке (зеленая кривая по правой оси)

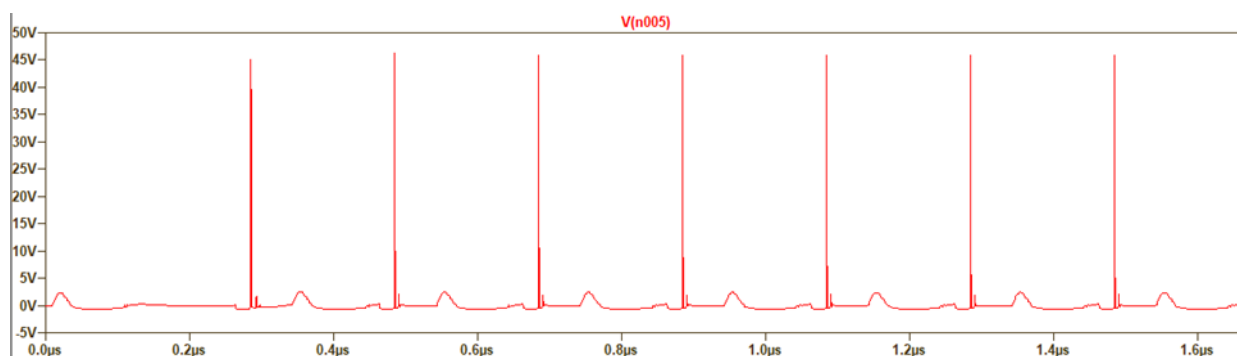


Рис. 4. К демонстрации работы генератора в режиме повторения импульсов при частоте следования  $f = 5$  МГц

## Выводы

В результате работы, была рассчитана схема генератора СКИ на основе коммерчески доступного диода 1N4148 фирмы OnSemi. Выявлены оптимальные режимы работы схемы. Установлено, что для получения стабильных амплитудно-временных параметров импульсов при работе генератора в режиме непрерывного повторения импульсов необходимо, чтобы период их следования был много больше длительности работы основного контура в апериодическом режиме. Регулировка режима работы схемы обеспечивается с помощью изменения номинала ограничительного резистора  $R_{огр}$ , что позволяет ускорить или замедлить перезарядку. В наилучшем случае амплитуда импульса составила  $U_{max} = 45$  В, длительность переднего фронта  $t_{фр} = 145$  пс,  $t_{0,5U_{max}} = 425$  пс.

## Список литературы

1. Сверхширокополосные и узкополосные системы связи совместная работа в общей полосе частот / И. Иммореев, А. Судаков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес №2, 2003г., – С.36-39.
2. Cross-Body UWB Radar Sensing of Arterial Pulse Propagation and Ventricular Dynamics / Timo Lauteslager, Mathias Tømmer, Tor S. Lande and Timothy G. Constandinou // 2018 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS) (DOI: 10.1109/BIOCAS.2018.8584690)
3. UWB Radar for Non-contact Heart Rate Variability Monitoring and Mental State Classification / Yang Han, Timo Lauteslager, Tor S. Lande // 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (DOI: 10.1109/EMBC.2019.8856920)
4. Augmented reality using ultra-wideband radar imagery / Lam Nguyen, Francois Koenig, Kelly Sherbondy // Proceedings Volume 8021, Radar Sensor Technology XV; 802104 (2011) Event: SPIE Defense, Security, and Sensing, 2011, Orlando, Florida, United States (DOI: <https://doi.org/10.1117/12.883285>)
5. Indoor Localization with Smart Floor Based on Time-coded UWB RFID and Ground Penetrating Radar / Angel Ramos, Antonio Lazaro, David Girbau, Ramon Villarino // RFID and Wireless Sensors Using Ultra-Wideband Technology, Elsevier, 2016 (DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-098-0.50007-0>)

6. Vital Sign Monitoring Through the Back Using an UWB Impulse Radar With Body Coupled Antennas / Elliott Schires, Pantelis Georgiou, Tor Sverre Lande // IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems, vol. 12, no. 2, Apr. 2018. (DOI: 10.1109/TBCAS.2018.2799322)
7. Pulse and Waveform Generation with Step Recovery Diodes. Application Note 918, Hewlett-Packard.
8. В. И. Брылевский, И. В. Грехов, В. М. Ефанов, А. Ф. Кардо-Сысоев, И. Г. Чашников, Д. И. Шеметило. Эффект быстрого восстановления обратного напряжения на симметричной р+рnn+ –структуре. ЖТФ – 1988, №58, в. 11, Ленинград.
9. A Study of a Low-Voltage Drift Step Recovery Diode // A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, et. al. // Proceedings of the 2017 IEEE North West Russia Section ElConRus 2017 – 2017.
10. Powerful Semiconductor 80 kV Nanosecond Pulser / V. M. Efanov, A. F. Kardo-Sysoev, M.A. Larionov, et al. // Pulsed Power Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 1997 11<sup>th</sup> IEEE International, 1997. — Vol. 2 — pp. 985–987.

## УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ ОКСИД МЕДИ ДЛЯ КАТАЛИЗАТОРОВ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ШЕВЧЕНКО Ю.Т.

*Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт  
(Технологический Университет)*

**Аннотация.** В работе разработана технология получения ультрадисперсного оксида меди путём разложения кислородосодержащих солей. Порошки оксида меди активно используются в качестве катализаторов на производстве. Первый этап – это получение оксалата меди, путём смешивания насыщенных растворов ацетата меди и щавелевой кислоты. Второй этап – проведение термического разложения оксалата меди.

*Ключевые слова:* оксалат меди, термическое разложение, кристаллогидрат, ультрадисперсный оксид меди

Порошки наноразмерного оксида меди широко применяются в различных областях промышленности. Его используют для изготовления полупроводников, керамических резисторах, газовых датчиков, а также как катализатор в целом ряде химических синтезов [1]. Повышение эффективности основных химических производств, а также решение экологических проблем тесно связано с разработкой и внедрением новых катализаторов и каталитических процессов. К катализаторам, как правило, предъявляется ряд требований, главными из которых являются термическая стабильность, механическая прочность сформованных гранул и оптимальная пористая структура, обеспечивающая высокую скорость массообменных процессов.

**Цель работы** - разработка технологии получения ультрадисперсного оксида меди путем разложения кислородсодержащих солей.

В работе изучен способ получения порошков ультрадисперсного оксида меди путем разложения кислородсодержащих соединений, и дальнейшее их использование, как каталитически активного компонента катализатора во многих химических процессах. В качестве кислородсодержащих солей использовали оксалат меди, который получали по следующей методике.

Для получения оксалата меди предварительно проводили очищение щавелевой кислоты перекристаллизацией из 1%-го водного раствора перекиси водорода. Кислоту добавляли в раствор перекиси при температуре 55°C до образования насыщенного раствора. Горячий раствор фильтровали, охлаждали до комнатной температуры. Выпавшие кристаллы кислоты отделяли от раствора декантацией и сушили при комнатной температуре. Кристаллогидрат оксалата меди (II) получали смешиванием насыщенных растворов ацетата соответствующего металла и щавелевой кислоты. В

результате реакции выпадал мелкодисперсный осадок оксалата никеля (II). Системе давали остыть до комнатной температуры. Осадок центрифугировали, промывали дистиллированной водой, переносили в чашку Петри и высушивали при 80°C в течение 2 часов. Полученный осадок бело-голубого цвета идентифицировали методом рентгенофазового анализа. Съёмка образцов проводилась на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (Cu K<sub>2</sub>-излучение, λ=1,54 Å, графитовый монохроматор на отражённом луче) со скоростью сканирования 2 град/мин. Идентификацию фаз, присутствующих в исследуемых образцах, проводили с использованием картотеки базы данных JCPDS. Проведенный анализ позволил идентифицировать полученный осадок как дигидрат оксалата меди, соответствующий карточке № 21–297, CuC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O.

Из литературных источников известно, что продукты термического разложения оксалатов металлов зависят от следующих условий: скорости нагрева, природы газовой смеси, в том числе инертной атмосферы [2]. Однако, главным фактором является обратимость гетерогенной химической реакции твердое-газ. Данный процесс различные исследователи проводят или с полным удалением газообразных продуктов в результате продувки инертным газом, или в квазиравновесных условиях между твердыми и газообразными продуктами, основными из которых являются монооксид и диоксид углерода. В работе [3] был предложен следующий механизм реакций разложения оксалатов по трем основным процессам:

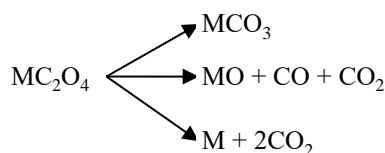


Рис.1. Механизм реакции разложения оксалатов

Несмотря на различия в образующихся конечных продуктах, эти исследователи считают, что начальной стадией распада всех оксалатов является разрыв связи С–С в анионе (C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup> ↔ 2CO<sub>2</sub><sup>-</sup>). Эта промежуточная частица может превращаться в карбонат (через образование карбонил–карбоната) или в СО<sub>2</sub> путем электронного переноса:

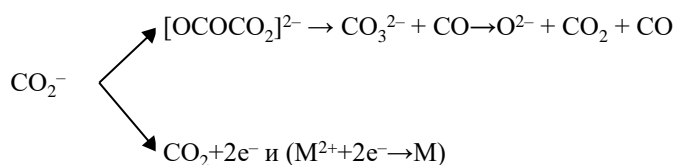
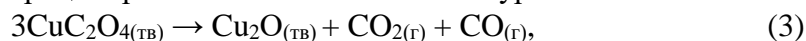


Рис. 2. Превращение промежуточной частицы в карбонат

Термическое разложение оксалата меди (II) проводили с использованием метода ДТ/ТГА в воздушной среде при нагревании до 500°C со скоростью нагрева 20°C/мин, образцы выдерживали в течение 15 минут.

Продуктом термического разложения оксалата меди на воздухе является металлическая медь и оксид меди (II), что подтверждается данными РФА номер карточки согласно базы данных JCPDS № 48-1548, размер частиц оксида составил 30-50 нм, примесь оксида меди (I) составляла не более 4 мас. %, процесс разложения можно описать уравнениями 3 и 4.







Таким образом при нагревании оксалата меди в атмосфере воздуха основными продуктами разложения являются оксиды. Получены порошки меди и ее оксида (30-50 нм) при термическом разложении соответствующих оксалатов. Полученные порошки можно использовать в качестве оксидно-медных катализаторов для химической промышленности.

#### Список литературы

1. Пивоваров Д.А., Голубчикова Ю.Ю., Ильин А.П. Получение порошков металлов и их оксидов термическим разложением оксалатов Cu, Ni, Co // Известия Томского политехнического университета. 2012. – Т. 321. № 3. – С. 11-15.
2. Christensen A.N., Lebeck B., Andersen N.H. et al. The Crystal Structure of Paramagnetic Copper(II) Oxalate (CuC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>): Formation and Thermal Decomposition of Randomly Stacked Anisotropic Nano-sized Crystallites // Dalton Transactions. – 2014. – V. 43, № 44. – P. 16754- 16768.
3. Болдырев В.В., Невьянцев И.С., Михайлов Ю.И., Хайретдинов Э.Ф. Изменение термической устойчивости оксалата серебра с добавками органических красителей // Кинетика и катализ. 1970. – Т.11, №2. – С. 367-372.

## ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

ШУБИНА М.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Работа посвящена разработке быстрой и простой технологии формирования микрофлюидной системы на основе термопластичных полимеров с использованием термокомпрессионного связывания, а также плазменной обработки.

*Ключевые слова:* микрофлюидика, микрофлюидный чип, лаборатория-на-чипе

#### Введение

На основе микрофлюидных систем возможно проведение таких операций, как культивирование клеток, анализ проб биологических материалов, разработка лекарственных препаратов, исследование их взаимодействия с тканями органов и опухолей [1]. Широкий диапазон возможностей использования в медицине, биохимии и биофизике обусловлен их характеристиками: малые размеры, низкая стоимость, работа с небольшими объемами реагентов, высокие скорости реакций, управление потоком жидкости с использованием ламинарного течения [2].

Производство микрофлюидных чипов предполагает проведение технологических операций, направленных на формирование в материале микроканалов, обеспечение подвода среды к ним и удаление продуктов реакций, а также на герметизацию структуры. Данная работа посвящена разработке быстрой технологии производства полимерных микрофлюидных систем: способам предварительной обработки исходных материалов, подбору температурного режима термокомпрессионного связывания. Сформированные по данной технологии 2 типа чипов представляют собой структуры: 1) из трех слоев, два из которых – полиметилметакрилат (ПММА) толщиной 1,5 мм, а слой рельефа – полиэтилентерефталат (ПЭТ) толщиной 300 мкм; 2) из двух слоев ПММА толщиной 1,5 мм (рисунок 1).

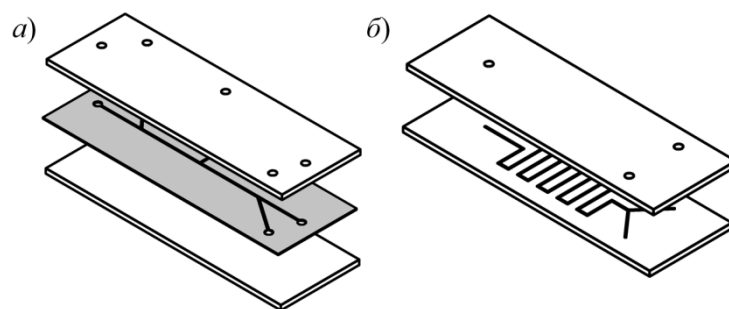


Рис. 1. Схематичный вид слоев структур: а) трехслойной, б) двухслойной

### Материалы и методы

Первый этап обработки материалов заключается в формировании каналов необходимой конфигурации с помощью лазерной абляции – обработки подложки лазерным лучом с длиной волны ИК-излучения в импульсном режиме с целью удаления поверхностного слоя. Выбраны оптимальные мощность, скорость движения углекислотного лазера, а также фокусное расстояние линз для получения необходимого профиля разреза (рисунок 2): для двухслойной системы – профиль в виде распределения Гаусса (ширина и глубина канала 160 мкм), для трехслойной системы – сквозной разрез (ширина канала 400 мкм, глубина 300 мкм).

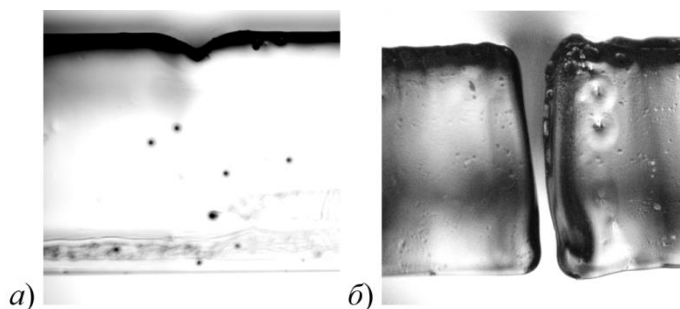


Рис. 2. Профили разреза: а) в виде распределения Гаусса, б) сквозной разрез

Следующий этап – очистка и активация поверхности полимера. Производится обезжиривание подложек в водном растворе изопропилового спирта (40%) и в деионизованной воде, далее – активация поверхности за счет обработки плазмой атмосферного давления в течение одной минуты. Плазма формируется диэлектрическим барьерным разрядом, возникающим в газе под действием приложенного переменного напряжения к проводящим электродам, хотя бы один из которых покрыт диэлектриком. В качестве одного из электродов разрядной системы используется аппарат Дарсонваль Карат ДЕ-212, второй электрод – обрабатываемый полимер на слое металла (рисунок 3).

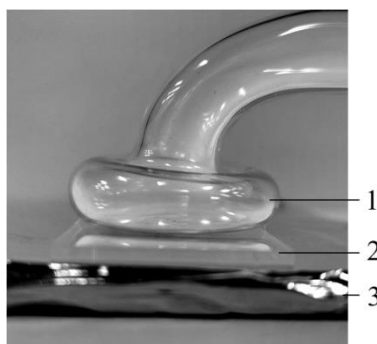


Рис. 3. Разрядная система: 1) стеклянный электрод аппарата Дарсонваль, 2) полимерная подложка, 3) алюминиевая фольга

Плазменная обработка позволяет значительно сократить время связывания слоев, а также повысить качество соединения. Активация поверхности ведет и к увеличению смачиваемости поверхности, поэтому для оценки эффективности плазменной обработки проведены измерения углов смачиваемости ПММА и ПЭТ при нанесении воды после одноминутной дарсонвализации (рисунок 4).

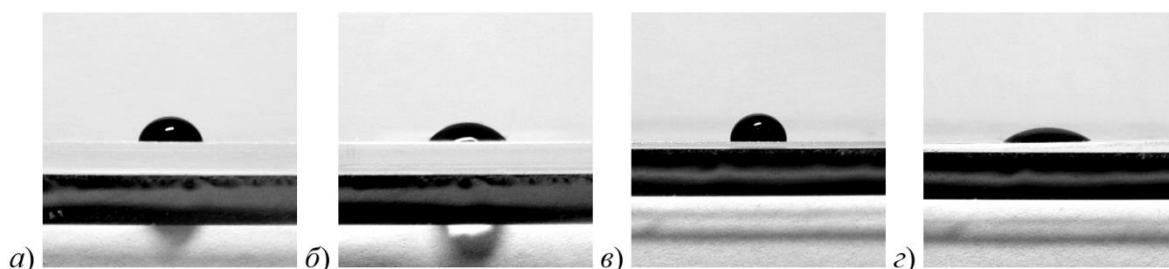


Рис. 4. Измерение угла смачиваемости ПММА (а, б) и ПЭТ (в, з): а) до обработки –  $79^\circ$ , б) после обработки –  $68^\circ$ , в) до обработки –  $90^\circ$ , з) после обработки –  $44^\circ$

Термокомпрессионное связывание осуществляется в термопрессе при температуре  $120^\circ\text{C}$  в течение 10 минут, после охлаждения до комнатной температуры микрофлюидный чип извлекается из установки. Малое время нагрева предотвращает помутнение слоя ПЭТ, что способствует поддержанию прозрачности системы.

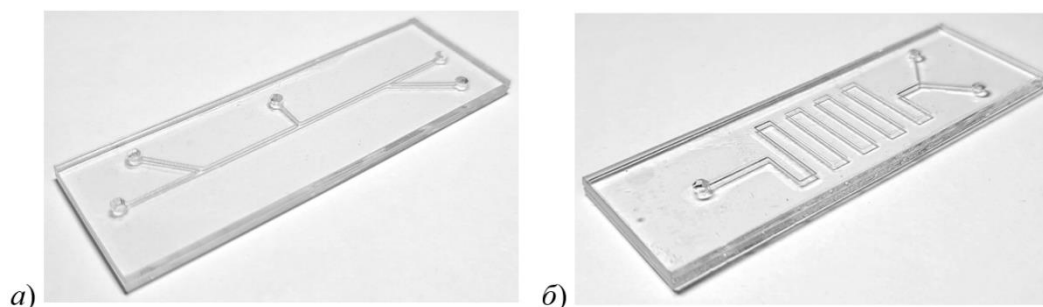


Рис. 5. Сформированные структуры: а) трехслойная, б) двухслойная

## Результаты

Герметичность сформированных по представленной технологии устройств проверена с помощью водного раствора флуоресцеина. Также устройства протестированы с помощью модельных микроорганизмов *Saccharomyces cerevisiae*, для которых проведено исследование управляемого некроза под воздействием препарата флуидоксонил. Для опухолевого сфероиды, полученного из образца мультиформной глиобластомы, проведена оценка инвазивного потенциала по относительному перемещению за единицу времени, а также выявлено направленное движение клеточных сфероидов в микрофлюидных каналах.

Разработанная технология позволяет формировать многослойные микрофлюидные устройства из термопластиков за короткий промежуток времени, обеспечивая хорошее качество соединения слоев и прозрачность системы. Дальнейшее развитие технологии предполагает подбор параметров для связывания других типов полимеров.

## Список литературы

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

1. Niculescu A. G., Chircov C., Bîrcă A. C., Grumezescu A. M. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review //International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Т. 22. – №. 4. – С. 2011.
2. Whitesides G. M. The origins and the future of microfluidics //nature. – 2006. – Т. 442. – №. 7101. – С. 368-373.

## ПЬЕЗОАКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ НАНОСТЕРЖНЕЙ ZnO

ЮФЕРИЦЫН М.Д., НИКОНОВА В.А., МАКСИМОВ А.И.,  
ГОРЛЯК А.Н., АЛЬТМАРК А.М., ЛЕСИВ Н.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная работа посвящена пьезоактивным чувствительным элементам на основе кристаллов оксида цинка. Описан принцип работы, достоинства и метод изготовления.

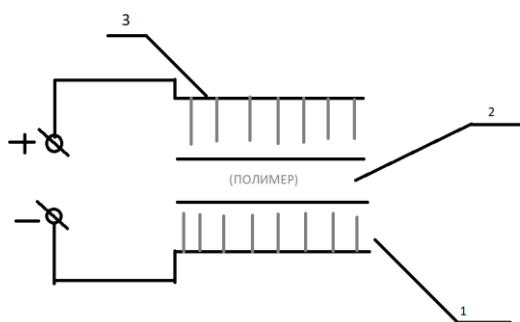
*Ключевые слова:* пьезоэлектрические чувствительные элементы, пьезоэлектрические наногенераторы, оксид цинка

Чувствительные элементы датчиков по принципу действия подразделяются на параметрические, в которых измеряемая величина воздействует на параметры чувствительного элемента (сопротивление  $R$ , емкость  $C$ , индуктивность  $L$  и т.д.), и генераторные, преобразующие неэлектрические величины в электрическую величину (напряжение, ток). Для работы параметрического датчика необходим внешний источник энергии.

Пьезоэлектрические датчики по-прежнему очень актуальны в разных областях применения благодаря их способности преобразовывать механическое давление или вибрацию в электрический сигнал. Они используются в промышленности, автомобилестроении, потребительской электронике, медицине и многих других отраслях [1].

Пьезоэлектрические датчики на основе наностержней оксида цинка считаются перспективными из-за уникальных свойств наноструктур оксида цинка. Эти датчики приобретают все большую актуальность в высокотехнологичных и исследовательских приложениях благодаря следующим преимуществам: высокая чувствительность, малые размеры, повышенная разрешающая способность, высокий уровень стабильности, а также совместимость с CMOS-технологиями и низкое энергопотребление вкуче с большим рабочим диапазоном [2].

Авторами [3] представлена конструкция чувствительного элемента на основе оксида цинка (рисунок 1). В работе был изготовлен чувствительный элемент по модифицированной конструкции: нанокристаллы оксида цинка были внесены в полимер и нанесены на проводящую подложку.



*Рис.1. Конструкция ПЭНГ.*

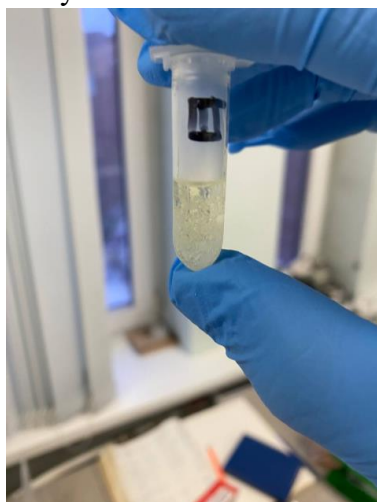
*На рисунке цифрами обозначены:*

- 1 – Наностержни ZnO*
- 2 – Полимер (полистирол, полиметилметакрилат и др.)*
- 3 – Подложка (Cu, Au)*

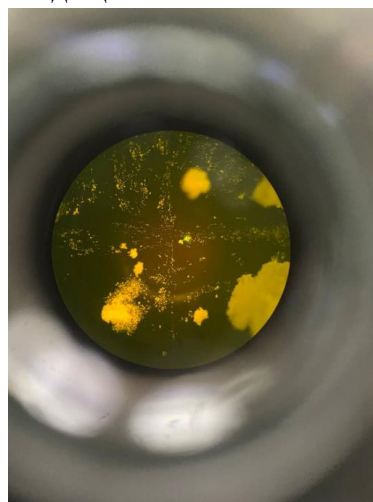
На первом этапе реализации данного чувствительного элемента в лабораторных условиях был получен раствор полимера в жидкой фазе – полистирол, растворённый в дихлорэтане.

Второй этап заключал в себе получение наностержней оксида цинка. Для этого был взят раствор гексагидрат нитрата цинка в кристаллической фазе массой 1,18 гр и растворён в дистиллированной воде, далее 0,56 гр. гексаметилентетрамина также были растворены в воде, после чего раствор был установлен на магнитную мешалку. В процессе перемешивания был добавлен водный раствор аммиака.

После того, как раствор становится прозрачным, он помещается в термостат с температурой 80 °С. В конечном счёте раствор высушивается в лабораторных условиях с комнатной температурой в течение двух дней, после чего помещается в высокотемпературную печь при температуре 500 °С на 30 минут. На этом активный компонент чувствительного элемента – наностержни оксида цинка – готов.



*Рис. 2. Получение раствора полимера*



*Рис. 3. Нанокристаллы ZnO при 170-кратном увеличении под микроскопом в УФ-излучении*

Далее оксид цинка смешивается с раствором полимера в равных пропорциях, и методом центрифугирования наносится на медную подложку.

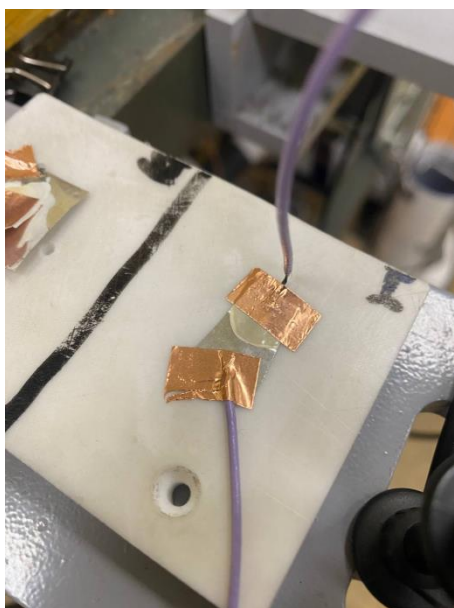


Рис. 4. Готовый чувствительный элемент

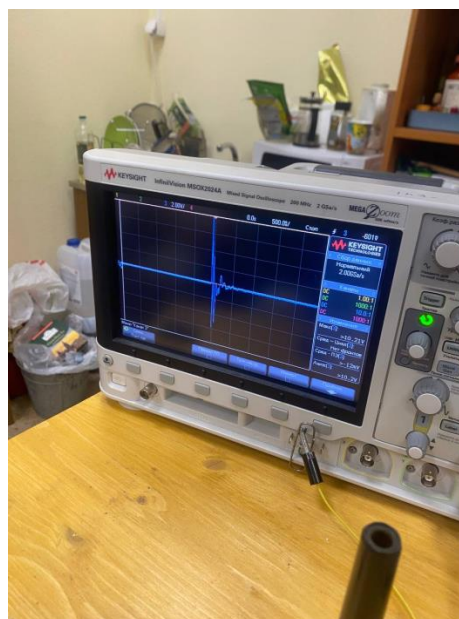


Рис. 5. Сигнал на осциллографе, снятый с чувствительного элемента

Сигналы, полученные с помощью осциллографа показали работоспособность и безотказность чувствительного элемента, было выяснено, что величина выходного сигнала зависит от величины внешнего воздействия.

Созданный по описанной технологии чувствительный элемент может быть использован в пьезоэлектрических датчиках.

### Список литературы

1. Наночастицы, наносистемы и их применение. Сенсорика, энергетика, диагностика/ под ред. В.А. Мошникова, А.И. Максимова СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2020.
2. Новейшие датчики/ под ред. В.В. Лучинина СПб.: Изд. Техносфера, Мск, 2007
3. Формирование пьезоэлектрических наностержней оксида цинка на зародышевых слоях, полученных методом SILAR / А.А. Семёнова, Н.А. Лашкова, А.И. Максимов, В.А. Мошников // Вестник Новгородского государственного университета. 2017, вып. (№5) 103.

## СЕКЦИЯ СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА

### ПРИКЛАДНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТОДИКИ РАНЖИРОВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ФИНАНСИРОВАНИЯ ПРИЕМНОЙ КАМПАНИИ ВУЗА НА ПРИМЕРЕ СПБГЭТУ «ЛЭТИ»

Е.Д. ГУХМАН, М.А. КОСУХИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В статье рассмотрено высшее учебное заведение с точки зрения реализуемой им инновационной деятельности в сфере маркетинга. В тексте приведен прикладной анализ инновационных решений в рамках деятельности по модернизации маркетинговой стратегии вуза. Приведены результаты анализа экспертов отрасли, выявлены узкие места, разработаны и предложены дополнительные решения. В результате составлена комплексная модель по итогам исследования.

*Ключевые слова:* маркетинг, высшее учебное заведение, методы ранжирования, инновационная деятельность, факторы мотивации, абитуриенты, привлечение, методика, метод анализа иерархий, экспертиза

В рамках маркетинговых активностей, направленных на привлечение абитуриентов, вузу необходимо постоянно модернизировать маркетинговую стратегию в зависимости от реакции аудитории, как следствие, обеспечение гибкости инструментов маркетинга и ориентация на ценности аудитории в рамках первичного восприятия бренда вуза.

В рамках деятельности по достижению целевых показателей КЦП существуют характерные особенности, которые нужно учитывать:

- необходимость сохранения и повышения среднего балла ЕГЭ при поступлении;
- необходимость соблюдения соотношения приема на бюджетной и контрактной основе;
- ограниченные ресурсы приемной кампании;
- усиление качественной конкуренции на рынке и тд..

Кроме того, одной из приоритетных задач в рамках программы развития СПбГЭТУ «ЛЭТИ» является значительный прирост студенческого контингента к 2030 году. Исходя из этого, маркетинговая деятельность по реализации приемной кампании обретает особую стратегическую важность для вуза. В рассматриваемой связи возникает потребность в углубленном изучении внутренних ценностей, которые транслирует вуз, и соотношении их с ценностями целевой аудитории приема. То есть, появляется потребность в повышении уровня клиентоориентированности вуза и адресности маркетинговой деятельности.

Для реализации этой задачи предлагается внедрение в бизнес-процесс маркетинга в рамках приемной кампании СПбГЭТУ «ЛЭТИ» методики ранжирования направлений

финансирования приемной кампании, выявления трендов мотивации абитуриентов для анализа текущей ситуации, выделения тренда и формирования стандартизированных предложений для составления стратегии приемной кампании.

После рассмотрения всех сторон проблемного поля, мы можем сделать вывод о необходимости и целесообразности внедрения цифровой системы, способной обеспечить гибкий подход к реализации маркетинга вуза. Такой системой может стать инструментарий поддержки принятия решений для прогноза ситуации, оценки текущего состояния и выработки стандартизированных стратегических решений. Под инструментарием может подразумеваться нейронная сеть, модель нечеткого логического вывода или смежная система, которая позволит, изменяя значение входных переменных, проследить тренд «отклика» целевой аудитории и внести соответствующие изменения в маркетинговую стратегию и ее реализацию.

Для конкретизации результатов исследования и предлагаемых инновационных решений проведем условную апробацию результатов с привлечением экспертного сообщества в рамках объекта обследования.

По результатам консультационных мероприятий подтверждена выдвинутая ранее гипотеза, о том, что необходим комплексный подход к решению упомянутой задачи. Эксперты вынесли заключение о необходимости дополнительных шагов для углубленного воздействия на проблемное поле.

Первым выявленным аспектом, подлежащим доработке, эксперты обозначили неполноту данных для анализа. Неполнота данных заключена в отсутствии актуальных данных на момент осуществления работы приемной комиссии в текущем году. Основываясь на данных прошлых периодов, имеет место вероятность появления изменений в мотивации абитуриентов и других стейкхолдеров при принятии решений о поступлении, которые не будут учтены и негативно отразятся на результатах всего процесса. Примерами таких изменений могут послужить многие: от введения в действие новых регламентов подачи документов для поступления в вуз до локальных трендов среди выпускников.

Для устранения этой проблемы в рамках разрабатываемой методики предлагается ввести сквозное анкетирование респондентов не только прошлых периодов, но и на текущий момент. Сквозное анкетирование в данном случае подразумевает опрос школьников – потенциальных абитуриентов на днях открытых дверей университета, практиках для старшеклассников в вузе и других целевых мероприятиях. Таким образом, данные будут обновляться с течением времени, это обеспечит гибкость системы и позволит обеспечить оперативное реагирование системы на изменения условий.

При реализации такого подхода выявляется следующее узкое место предлагаемого решения. Данные обновляются быстро, могут быть представлены в разных шкалах и сложны для анализа, в таком случае необходимо определить правила снятия среза данных. В данном случае применим следующую возможность. При составлении анкеты предусмотрим тип данных, получаемых на выходе (шкала рангов; порядковая шкала). В качестве мер оценки актуальности данных для дальнейшей приоритизации факторов мотивации абитуриентов выберем моду и медиану, поскольку эти меры представляется возможным применять для работы с порядковыми шкалами, в рамках которых респондентами производилась оценка, в то время как применение среднеарифметической оценки целесообразно только для метрических шкал.



Выбор медианы и моды в качестве инструментария обработки шкалы обусловлен допустимостью преобразований порядковой шкалы с целью отыскания соответствующей адекватной результирующей статистики группового оценивания. Из всех средних по Коши допустимыми средними в порядковой шкале являются только члены вариационного ряда (порядковые статистики), в качестве среднего для данных, измеренных в порядковой шкале, можно использовать, в частности, медиану (при нечетном объеме выборки). При четном же объеме следует применять один из двух центральных членов вариационного ряда - как их иногда называют, левую медиану или правую медиану. Моду также можно использовать - она всегда является членом вариационного ряда. Анализ на основе моды может быть проведен при помощи доступных онлайн платформ для проведения маркетинговых опросов, например Яндекс Формы.

Третье важное дополнение к решению по мнению экспертов – это учет влияния многих факторов. Для такого анализа и учета важна разработка многокритериальной модели выбора приоритетных направлений дальнейшего перераспределения финансовых ресурсов, так как система в целом должна помогать в принятии решения о распределения статей бюджета в рамках расходов приемной комиссии. Для это обозначим группы факторов, влияющих на процесс, одной из которых станет группа «поведение абитуриентов» на основе собранных данных, другая группа «внешние факторы», связанная с условиями среды, группа «ограничения». Исходя из данных условий используем методику распределения приоритетности факторов, которая основана на решении задачи расчета приоритетности факторов инвестиционной привлекательности с помощью метода анализа иерархий.

Метод Анализа Иерархий (МАИ) — математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений. МАИ не предписывает лицу, принимающему решение (ЛПР), какого-либо «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к ее решению [16].

Пусть  $X = \{X_1, \dots, X_n\}$  — набор объектов (решений, альтернатив), которые оцениваются набором критериев. Задача оптимизации, решаемая с помощью МАИ, представляется лицом, принимающим решение (ЛПР) в виде особой структуры — иерархии: на низшем уровне располагаются объекты (решения), которые необходимо ранжировать по предпочтениям ЛПР, наивысший уровень состоит из главного критерия (цели), в качестве которого выступает ЛПР, на промежуточных уровнях задаются подкритерии (подцели). Задача принятия решения здесь сводится к задаче ранжирования объектов по степени их предпочтительности, с учётом главной цели и подцелей.

При наблюдении за физическими и юридическими лицами, участвующими в процессе построения и установления приоритетов иерархии, обнаружено, что лица, знакомые с определенной проблемой, могут построить ее иерархию разными способами, однако если суждения лиц схожи, то их результаты будут близки.

Для компьютерной поддержки МАИ существуют программные продукты, разработанные различными компаниями.

Анализ проблемы принятия решений в МАИ начинается с построения иерархической структуры, которая включает цель, критерии, альтернативы и другие рассматриваемые факторы, влияющие на выбор. Эта структура отражает понимание проблемы лицом, принимающим решение.

Каждый элемент иерархии может представлять различные аспекты решаемой задачи, причем во внимание могут быть приняты как материальные, так и нематериальные факторы, измеряемые количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки. Иными словами, анализ ситуации выбора решения в МАИ напоминает процедуры и методы аргументации, которые используются на интуитивном уровне, что соответствует цели исследования и источнику собранных данных.

Следующим этапом анализа является определение приоритетов, представляющих относительную важность или предпочтительность элементов построенной иерархической структуры, с помощью процедуры парных сравнений. Безразмерные приоритеты позволяют обоснованно сравнивать разнородные факторы, что является отличительной особенностью МАИ. На заключительном этапе анализа выполняется синтез (линейная свёртка) приоритетов на иерархии, в результате которой вычисляются приоритеты альтернативных решений относительно главной цели. Лучшей считается альтернатива с максимальным значением приоритета.

Метод анализа иерархий удовлетворяет необходимости многокритериального анализа, в качестве метода поддержки принятия решений подходит под текущие условия, может быть применен и автоматизирован путем применения пакета проектирования систем нечеткой логики на основе функции принадлежности.

Отообразим итоговое решение, предлагаемое к внедрению с учетом экспертных оценок, на схеме (рисунок 1).

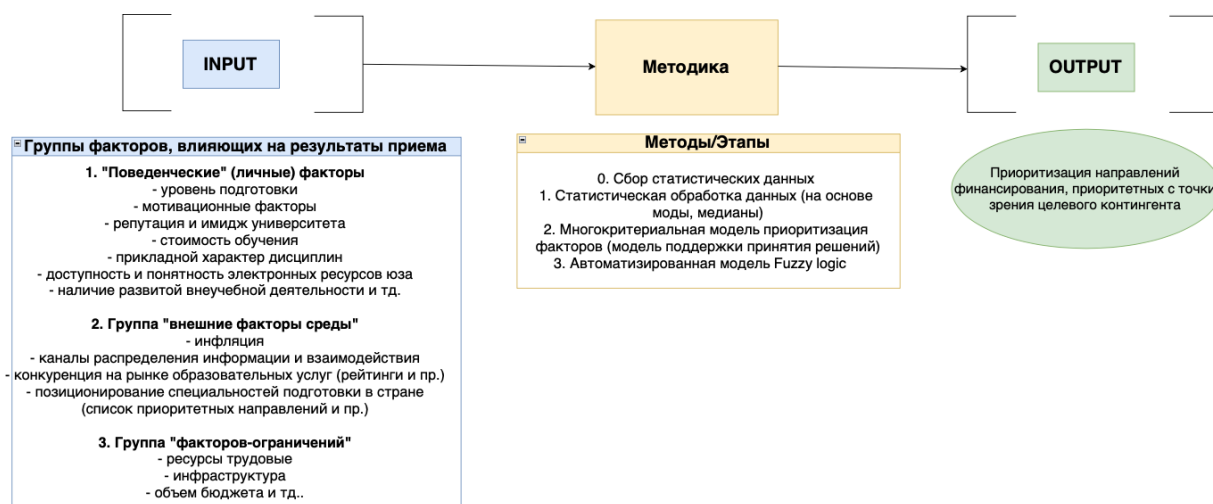


Рисунок 1 – схема предлагаемого решения с учетом экспертизы.

### Список литературы:

1. Саати, Т.Л. Аналитическое планирование: организация систем [Текст] / Т.Л. Саати, К.К. Кернс. – Москва: Радио и связь, 1991, вып. №1 с. 358.
2. Семенов М.Г., Князева И.В., Черняев С.И. ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5. ; URL: <https://science-education.ru/ruя/article/view?id=10303> (дата обращения: 01.05.2024)
3. Гухман Е.Д., Косухина М.А., Цифровые технологии в задачах маркетинговой деятельности университета: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции студентов,

## ВЫБОР МОБИЛЬНОЙ ОС ДЛЯ ХУДОЖНИКА

БОЛЬШАКОВА А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** В данном докладе рассматривается сравнительный анализ операционных систем iPadOS и Android с точки зрения их применимости для художественной работы. Разбираются основные аспекты, такие как доступность приложений, поддержка стилусов, функциональность программного обеспечения и характеристики устройств. Автор оценивает преимущества и недостатки каждой платформы, а также выделяет перспективы развития данного направления, учитывая современные тенденции в технологическом прогрессе.

*Ключевые слова:* операционные системы, iPadOS, Android, художественная работа, программное обеспечение, приложения, стилусы, технологический прогресс

Дискуссия о преимуществах между операционными системами iPadOS и Android столь же стара, как и сама их существование, исследовать этот вопрос — задача не из простых, представляющая собой целый комплекс проблем. Моим интересом является нечто более конкретное: какая из этих операционных систем лучше подходит для творческой работы художника?

В данном докладе я попытаюсь систематизировать данные и детально рассмотреть преимущества и недостатки обеих операционных систем с точки зрения художественного творчества, а также предположить перспективы развития технологий в области цифрового изобразительного искусства.

Поскольку необходимость в иллюстративном материале присутствует во всех сферах современной жизни, разработка и совершенствование инструментов для цифрового рисования является чрезвычайно актуальной проблемой.

Для эффективной работы художнику необходимо наличие удобного устройства, стилуса, специализированного программного обеспечения для рисования, а также дополнительных материалов, включая референсы, текстуры и обучающие материалы из сети Интернет. Далее следует рассмотреть каждый из этих аспектов подробнее.

Начнем с проблемы загрузки материалов. Ранее на iPadOS эта задача представляла собой значительную сложность, поскольку доступ к загрузке файлов в Google, включая изображения с высоким разрешением, требовал перехода в сторонние браузеры, такие как Chrome или Safari. В то время как на Android этот процесс был более прост и интуитивно понятен. Однако с течением времени ситуация изменилась: Apple внедрили возможность загрузки файлов из различных источников на iPadOS, что решило данную проблему, которая ранее часто упоминалась в тематических статьях.

Теперь обратимся к вопросу стилусов. Важно отметить, что существует два вида стилусов: пассивные и активные.

Пассивные стилусы внешне напоминают карандаш с полусферой из резины или силиконовой круглой пластинкой вместо грифеля. Они имитируют действие пальца на экране и не требуют подключения к устройству или зарядки. Они совместимы как с

iPadOS, так и с Android, но не поддерживают функции давления и наклона, которые крайне важны для художественных работ.

Активные стилусы, напротив, поддерживают регулировку давления и наклона, но требуют подключения к устройству. На устройствах Apple такие стилусы, как Apple Pencil, отлично интегрированы и поддерживаются большинством приложений. Доступны и сторонние стилусы меньшей стоимости.

Однако на Android ситуация сложнее из-за разнообразия устройств и недостаточной стандартизации: крайне сложно подобрать стилус под конкретный девайс, если только сам производитель не разработал подходящий. Кроме того, многие приложения на Android могут не поддерживать сторонние активные стилусы, что создает дополнительные сложности для художников.

В этом аспекте Android уступает iPadOS, хотя изменения к лучшему есть: многие производители планшетов разрабатывают для своих девайсов качественные стилусы. Например, компания Samsung дополнила свою линейку планшетов пером S Pen.

Необходимо рассмотреть также выбор между операционными системами iPadOS и Android в контексте использования программного обеспечения (ПО), включая приложения, доступные для этих платформ. Известно, что в App Store имеется множество эксклюзивных приложений, таких как:

1) Procreate — одна из самых популярных программ для цифрового рисования с крайне широким функционалом и огромной базой пользовательского контента: кистей, палитр, обучающих уроков и курсов. Доступно также анимирование созданных изображений. Недавно появилось приложение Procreate Dreams, полностью заточенное под анимацию и удобный перенос работ между обоими приложениями.

2) Artstudio Pro — программа с похожим на Photoshop интерфейсом, предоставляет схожий набор инструментов, в других приложениях отсутствующих: осветление, затемнение, губка и прочие.

3) Paintstorm — приложение с впечатляющим уровнем кастомизации. Позволяет переделать под себя весь интерфейс, начиная от размера иконок инструментов и заканчивая окнами функций. Помимо этого, очень удобно для создания пользовательских кистей благодаря гибким настройкам.

4) Realistic — программа для имитации традиционного рисования, главным образом акварели. Может похвастаться уникальной физикой кистей и холста, очень точно передающей ощущения от реальной акварели.

5) Art Set — еще одна программа для подражания традиционному рисованию, но специализирующаяся на масляных красках.

6) iArtbook — абсолютно бесплатное подобие Procreate со схожим набором функций, но поддерживающее гораздо меньшее количество кистей.

Все они недоступны пользователям Android. В свою очередь, пользователи Android имеют доступ к приложениям, таким как IbisPaint, Medibang, Infinity Painter, которые, однако, также доступны на iPadOS.

В прошлом ситуация была более неприятной для пользователей Android, поскольку ни одно приложение не поддерживало экспорт и импорт файлов в формате psd. В то время Procreate и другие успешно решали эту задачу на iPadOS, что делало их более предпочтительными для цифровых художников.

В настоящее время приложения для Android, такие как IbisPaint, Infinity Painter и Medibang, не уступают по функционалу Procreate. Они поддерживают различные форматы файлов и предоставляют широкий спектр инструментов для рисования и анимации.

Тем не менее, на Android до сих пор существуют определенные проблемы. Во-первых, отсутствует поддержка импорта кистей из Photoshop, что затрудняет кастомизацию инструментов. Во-вторых, некоторым пользователям может не хватать приложений, специализирующихся на имитации традиционных художественных материалов, таких как акварель или масло. В-третьих, выбор приложений для Android ограничен в сравнении с iPadOS, что может затруднять поиск приложения, соответствующего потребностям пользователя.

Кроме того, устройства на iPadOS ограничены не только самой операционной системой, но и набором доступных моделей, которые имеют ограниченное разнообразие характеристик, таких как размер и соотношение сторон экрана. Все модели iPad, кроме iPad Mini (он мало подходит комфортного рисования по причине маленьких габаритов), имеют соотношение сторон примерно 4:3. Для пользователей ноутбуков и компьютеров куда привычнее планшеты с 16:9 или 16:10, но таких iPad просто не существует. Это может ограничить выбор для пользователей, предпочитающих определенные характеристики устройства.

Другим примером ограничений является вероятность появления на рынке iPad с OLED-дисплеями, что регулярно обсуждается в новостях. Хотя это еще не реализовалось, многие опасаются такого развития событий из-за известного эффекта ШИМ, мерцания экрана, способного вызывать утомление глаз и головные боли. Для художников, которым приходится длительное время работать с устройством, такое обновление могло бы создать серьезные проблемы.

Невольно напрашивается вопрос, а не могли бы отечественные разработчики создать продукцию, решающую эти проблемы? На первый взгляд, звучит невероятно, так как конкурировать с признанными лидерами рынка крайне сложно. Однако, как показала практика импортозамещения, делать качественное ПО российские разработчики умеют. К примеру, банковские системы и телеком-сфера стоят на переднем крае цифровизации в мире, поэтому, при создании благоприятных условий и должной поддержке, возможно, даже государственной, вполне вероятно появление талантливых разработчиков, которые создадут достойные аналоги зарубежных программ для цифровой живописи.

Таким образом, хотя в настоящее время iPadOS остается предпочтительным выбором для цифровых художников, система Android быстро догоняет его в функциональности и удобстве использования ПО. Несмотря на некоторые ограничения, пользователи Android имеют все больше альтернатив для творческой работы. И, можно надеяться, в скором времени приложений появится еще больше, в том числе созданных отечественными производителями.

### Список литературы

1. Хортон Дж., Разработка Android-приложений с нуля
2. Колисниченко Д., Android для пользователя
3. Сигал Х., Вдохновляющие примеры Apple
4. Косиенда К., Как создавались лучшие продукты Apple во времена Стива Джобса
5. Пол К., Цифровое искусство
6. Ерохин С., Эстетика цифрового изобразительного искусства
7. Первухина А., Рисование в Procreate
8. Маслова Е., Техники создания цифровой иллюстрации

## СТАНДАРТЫ ИСО ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ю. БОРОВИКОВА, Е. И. ЕКИМОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты исследования международных стандартов, поддерживающих реализацию концепции «устойчивое развитие» на предприятиях пищевой промышленности, в том числе ISO 22000:2018, ISO 26000:2010 и ISO 20400:2017. Приводится обоснование необходимости использования перечисленных стандартов, определяются их требования и рекомендации, а также возможные выгоды от внедрения или сертификации. Результаты исследования могут быть использованы предприятиями пищевой промышленности при внедрении и развитии интегрированных систем менеджмента, направленных на поддержку достижения целей устойчивого развития.

*Ключевые слова:* устойчивое развитие, цели устойчивого развития, интегрированные системы менеджмента, системы менеджмента безопасности пищевой продукции, социальная ответственность, устойчивые закупки.

Международная организация по стандартизации ISO разрабатывает стандарты на системы менеджмента, способствующие достижению целей ООН в области устойчивого развития (ЦУР) для многих областей экономической деятельности, включая производство продуктов питания. Пищевая промышленность играет важную роль в реализации концепции «устойчивое развитие», особенно характер ее деятельности связан с такими аспектами данного подхода, как обеспечение безопасности продуктов питания, рациональное использование природных ресурсов, формирование устойчивых цепочек поставок, а также создание устойчивой занятости населения.

Вторую цель ООН в области устойчивого развития «Ликвидация голода» поддерживают более 1600 стандартов ISO, затрагивающих вопросы производства продуктов питания [1]. Данные документы разработаны в целях повышения уровня доверия общества к пищевой продукции, обеспечения результативного контроля за безопасностью продуктов питания. Среди стандартов, уделяющих внимание продовольственному сектору, стандарт ISO 22000:2018 «Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в цепи создания пищевой продукции» имеет особую значимость для достижения ЦУР №2. Применение данного стандарта может помочь организации обеспечить безопасность продуктов питания и снизить риски для здоровья населения от потребления пищевой продукции, зараженной физическими, микробиологическими, химическими или аллергенными рисками.

Другим стандартом, способствующим реализации концепции «устойчивое развитие» на предприятиях пищевой промышленности, является стандарт ISO 20400:2017 «Устойчивые закупки. Руководство». Применение положений указанного стандарта позволяет организации учитывать экологические, социальные и экономические аспекты при выборе поставщиков и управлении цепочками поставок, увеличивая вклад в достижение ЦУР №1 «Ликвидация нищеты», №2 «Ликвидация голода», №3 «Здоровье и благополучие», а также №12 «Ответственное потребление и производство».

Внедрение стандарта ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности» может помочь предприятиям пищевой промышленности осуществлять деятельность с учетом принципов социальной ответственности и требований в области социальной

ответственности всех заинтересованных сторон, включая сотрудников, клиентов, поставщиков и общество в целом. Данный стандарт способствует достижению ЦУР №1 «Ликвидация нищеты», №2 «Ликвидация голода», №5 «Гендерное равенство», №8 «Достойная работа и экономический рост» и №10 «Сокращение неравенства».

Существуют и другие стандарты, поддерживающие предприятия пищевой промышленности во внесении вклада в устойчивое развитие.

Стандарт ISO 14001:2015 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» обеспечивает возможность для внедрения систем экологического менеджмента, которые способствуют снижению негативного воздействия на окружающую среду и достижению ЦУР №12 «Ответственное потребление и производство», №13 «Борьба с изменением климата», №14 «Сохранение морских экосистем», №15 «Сохранение экосистем суши».

Стандарт ISO 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» поддерживает внедрение систем менеджмента качества и интегрированных систем менеджмента, что создает основу для достижения всех целей в области устойчивого развития. В дополнение, стандарт особенно ориентирован на достижение ЦУР №13 «Борьба с изменениями климата» благодаря введению дополнения от 24 февраля 2024 года в отношении климата.

Стандарт ISO 31000:2018 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» предоставляет собой свод положений по управлению рисками, в том числе связанными с обеспечением безопасности пищевых продуктов, снижением негативного воздействия на окружающую среду и другими рисками в области устойчивого развития. Данный стандарт содержит в себе универсальный подход к процессу управления рисками, в связи с чем может быть использован при планировании мероприятий для достижения любых целей устойчивого развития.

Стандарт ISO 28000:2022 «Безопасность и устойчивость. Системы менеджмента безопасности. Требования» направлен на обеспечение безопасности и надёжности цепи поставок, что важно для пищевой промышленности. Данный стандарт поддерживает достижение ЦУР №15 «Рациональное использование экосистем суши», например, при отслеживании цепи поставок древесины, материалы из которой часто используются для производства вторичной упаковки продуктов питания.

Стандарт ISO 45001:2018 «Системы менеджмента охраны здоровья и безопасности труда» способствует обеспечению безопасности работников и предотвращению несчастных случаев на производстве, что согласуется с ЦУР №3 «Здоровье и благополучие», №8 «Достойная работа и экономический рост», №9 «Индустриализация, инновации и инфраструктура».

Каждый из вышеперечисленных стандартов содержит руководство или требования, которые способствуют достижению целей устойчивого развития. В таблице 1 представлены результаты исследования некоторых стандартов, а именно ISO 22000:2018 [2], ISO 26000:2010 [3] и ISO 20400:2017 [4], влияющих на деятельность в области устойчивого развития предприятий пищевой промышленности. Определены разработчики стандартов, наличие или отсутствие национальной версии, требования и рекомендации, а также возможные результаты от внедрения или сертификации.

*Таблица 1*

**Результаты исследования стандартов ISO 22000:2018, ISO 26000:2010 и ISO 20400:2017**

Описание стандарта	Стандарт		
	ISO 22000:2018	ISO 26000:2010	ISO 20400:2017
Полное название	Food safety management systems – Requirements for any organization in the food chain	Guidance on social responsibility	Sustainable procurement – Guidance
Разработчик	Международная организация по стандартизации ISO, Технический комитет ISO/TC 34 «Продукты питания», Подкомитет SC 17 «Системы менеджмента пищевой безопасности»	Международная организация по стандартизации ISO, Рабочая группа ISO/TMB по социальной ответственности	Международная организация по стандартизации ISO, Проектный комитет ISO/PC 277 «Устойчивые закупки»
Наличие национальной версии РФ	ГОСТ Р ИСО 22000-2019 «Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в цепи создания пищевой продукции»	ГОСТ Р ИСО 26000-2012 «Руководство по социальной ответственности»	-
Требования/рекомендации	- Требования к разработке и внедрению системы ХАССП; - Требования, предусмотренные высокоуровневой структурой ISO, в области безопасности пищевой продукции.	- Руководство по основным вопросам социальной ответственности; - Рекомендации по интеграции социальной ответственности в деятельность организации в зависимости от сферы деятельности; -Руководство по решению основных вопросов и проблем, связанных с социальной ответственностью.	- Рекомендации по внедрению принципов устойчивого развития в процессы закупок организации; - Рекомендации по организации процесса закупок в рамках подхода устойчивого развития.
Результаты от внедрения, сертификации	- Обеспечение постоянного контроля безопасности пищевой продукции; - Обеспечение стабильности производства за счет постоянного мониторинга рисков; - Соблюдение законодательных требований в области безопасности пищевых продуктов; - Повышение доверия потребителей; - Возможность сотрудничества с новыми поставщиками, конкурентоспособность; - Снижение издержек за счет уменьшения числа	Руководство не предусматривает сертификацию. Результаты от внедрения: - Повышение репутации среди потребителей и партнеров; - Возможность привлечения более квалифицированного персонала; - Снижение юридических рисков, связанных с нарушением прав человека, экологическими проблемами и др.; - Преимущество при участии в тендерах и других конкурсах; - Конкурентоспособность, возможность	Руководство не предусматривает сертификацию. Результаты от внедрения: - Повышение экологической эффективности производства; - Повышение репутации среди потребителей и партнеров; - Снижение юридических рисков, связанных с несоблюдением законодательства в сфере экологии; - Преимущество при сотрудничестве с международными компаниями, так как



	претензий от потребителей, перепроизводства вследствие несоответствия продукции.	сотрудничества с крупными международными компаниями.	соблюдение рекомендаций стандарта является обязательным требованием некоторых организаций при участии в тендерах и других конкурсах.
--	--	--	--

Таким образом, внедрение стандартов ISO является мощным инструментом для достижения устойчивого развития и обеспечения долгосрочной конкурентоспособности организации. Совместное применение рассмотренных выше стандартов имеет синергический эффект и способствует созданию интегрированной системы управления, которая направлена на улучшение репутации организации, повышение доверия потребителей и партнёров, а также снижение операционных и организационных рисков.

Перспективным направлением для развития данного исследования является изучение возможности применения других международных стандартов ISO для поддержки предприятий пищевой промышленности в достижении целей устойчивого развития.

### Список литературы

1. Официальный сайт Международной организации по стандартизации ISO. URL: <https://www.iso.org/ru/sdg/SDG02.html> (дата обращения: 11.04.2024).
2. ISO 22000:2018 «Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain». URL: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:22000:ed-2:v1:en> (дата обращения: 11.04.2024).
3. ISO 26000:2010 «Guidance on social responsibility». URL: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:en> (дата обращения: 14.04.2024).
4. ISO 20400:2017 «Sustainable procurement – Guidance». URL: <https://www.iso.org/obp/ui/ru/#iso:std:iso:20400:ed-1:v1:en> (дата обращения: 16.04.2024).

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ БИЗНЕСОМ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

ГРИНЕВИЧ Е.Д., ЛЕВИНА В.М.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация:** Актуальность данного исследования обусловлена тем, что в настоящее время руководители крупных компаний ощущают острую необходимость в цифровизации рабочих процессов, обновлении и трансформации цифрового ландшафта. Для повышения конкурентоспособности компаний руководство прибегает к модернизации и внедрению инновационных бизнес-моделей. В результате исследования изучены инновационные подходы и проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков новых технологий, используемых для трансформации бизнеса. В статье представлены примеры компаний, использующих данные методы. Изучив эти подходы, мы поняли, что предприятия чаще всего внедряют в свою работу искусственный интеллект, роботов и используют аналитику данных для избежания ошибок, прогнозирования событий и понимания своих клиентов.

*Ключевые слова:* инновационные подходы; прогнозирование; автоматизирование; тестирование; новые идеи.

Технологии развиваются с каждым годом и претерпевают существенные изменения. В связи с этим следует понимать и знать инновационные подходы для того, чтобы адаптироваться к вызовам, быть конкурентоспособными и принимать взвешенные и правильные решения в быстроменяющихся условиях в управлении предприятием или фирмой. Цифровая трансформация подразумевает под собой изменения классической

бизнес-модели и перевод привычных процессов в цифру с помощью современных технологий, внедрения инновационных разработок и нахождение правильного подхода в работе с современными клиентами для увеличения результативности функционирования предприятия. Поэтому важно шагать в ногу со временем и привносить изменения в бизнес-среду [1].

Рассмотрим каждый из пяти подходов, которые можно применить в бизнесе.

Прогнозирование развития ситуации за счет анализа ранее собранных статистических данных прошлых периодов (Big Data, Большие Данные)

Аналитика данных является одной из составляющих в управлении бизнесом за счет принятия наиболее верных решений на основе полученных данных. Анализом больших данных занимается аналитик Big Data, который в свою очередь обрабатывает базы данных по транзакциям, номерам телефонов, почте, посещаемости пользователями интернет-ресурсов, проданным товарам и услугам и др. С помощью сбора данных аналитик может сделать прогноз трендов и событий для разработки оптимальной стратегии и следующих шагов для повышения уровня продаж. Благодаря аналитике данных компании способны понимать предпочтения своих клиентов. Зная чего хотят покупатели, можно расширить каталог товаров и увеличить поставки наиболее покупаемого продукта. Управление рисками тоже играет роль, потому что выявление угроз заранее позволяет фирмам вовремя принять незамедлительные действия и потерять меньше ресурсов или вообще избежать потерь [2].

Автоматизирование бизнес-процессов с помощью искусственного интеллекта и роботов.

С каждым годом технологии все больше развиваются, и человека в производстве заменяют не только роботами, но и искусственным интеллектом (ИИ). Автоматизирование работы набирает популярность и становится востребованным подходом уже сейчас. Эти методы помогают компаниям снизить затраты на оплату труда, работать эффективнее и качественнее, исключая при этом человеческий фактор. Роботы способны автоматизировать рутинные и однообразные задачи. Это позволит занять работников более интересными заданиями, требующих знания всех тонкостей специальности и креативности. Одними из интересных способностей искусственного интеллекта можно считать создание текста по ключевым словам, фразам и сжатие текста. Он способен писать программные коды, анализировать тренды рынка, считать экономику проектов и др [3].

Проведение пентеста для избежания утечки важной информации.

Пентест – это способ проверки IT-системы на проникновение злоумышленников, который используют специалисты по информационной безопасности. Он нужен для того, чтобы искать слабые и незащищенные места в IT-системах с помощью взлома платформы или сайта компании. Тестировать на уязвимость системы гораздо проще и дешевле, чем налаживать и восстанавливать работу всех процессов от кибератак и утечек важной информации. Пентестер использует несколько способов для тестирования. Внутренний способ заключается в том, что тестировщик находится в инфраструктуре и крадет данные. У внешнего способа есть три методики: черный, серый и белый ящики. Метод «черный ящик» заключается в том, что у атакующего человека есть минимальные знания о компании. Рассматривается ситуация, в которой хакер как бы не имеет доступа к внутренней составляющей сайта, но ищет уязвимости для входа в систему. Методика «серый ящик» состоит в том, что взломщику работники предприятия как бы сливают

какие-то конфиденциальные данные. Третий метод наиболее глубокий для анализа уязвимостей, потому что у пентестера есть вся необходимая информация [4].

Применение дизайн-мышления для решения нестандартным способом задач и поиска интересных идей.

Дизайн-мышление - это полезный инструмент для создания, реализации новых идей и улучшения продуктов. Это творческий подход, позволяющий понять своих клиентов, его проблему и придумать пути ее разрешения. К этапам дизайн-мышления можно отнести эмпатию, то есть изучение вашей целевой аудитории (ЦА); поиск проблем; создание концепции во время мозгоштурма; разработка прототипа, решающего проблемы; проверка готового макета на ЦА [5].

№ подхода	преимущества подхода	недостатки подхода	примеры
1. прогнозирование развития ситуации за счет анализа ранее собранных статистических данных прошлых периодов (Big Data, Большие Данные)	прогноз ситуаций; понимание ЦА; управление рисками; повышение качества работы компании за счет исправления ошибок	отсутствие качественных исходных данных; нарушение конфиденциальности клиентов;	Google, Яндекс; Vk; Nestle; HeadHunter; Optum
2. автоматизирование бизнес-процессов с помощью искусственного интеллекта и роботов	сокращение финансовых и временных затрат; ИИ работает круглосуточно; исключение человеческого фактора; решение повторяющихся задач; минимизация рисков на производстве; создание контента	высокая стоимость; результаты могут быть неточными; ИИ еще разрабатывается	Google, Яндекс; HeadHunter; MTS; IKEA; Prada
3. проведение пентеста для избежания утечки важной информации;	поиск ошибок и слабых мест в системе; улучшение проблем; помогает избежать кибератак и утечки данных	высокая стоимость; обнаружение не всех слабых мест; пентест делают долго по времени	правительственные организации; органы местного самоуправления; федеральные службы
4. применение дизайн-мышления для решения нестандартным способом задач и поиска интересных идей.	поиск новых идей; понимание целевой аудитории; работа в команде	занимает много времени; не всегда может рассмотреть все потребности клиентов	Airbnb; Apple; Uber
5. поиск внешних источников инноваций	обмен знаниями; появление новых идей; продвижение компании из-за рекламы мероприятия; в компании стажировются талантливые и креативные молодые люди	затраты на организацию мероприятий	Газпром; Вектор; Океанприбор

Рис.1. Сравнение подходов

Поиск внешних источников инноваций.

Для того, чтобы внедрить интересные идеи в работу вашего бизнеса необходимо их придумать. Бывают ситуации, когда компании не могут самостоятельно разработать то, что отличит их от конкурентов, и они прибегают к помощи студентов, школьников и молодых профессионалов, готовых работать за идею. Следует проводить конференции и мероприятия для подрастающего поколения, которые в свою очередь будут создавать проекты и пытаться реализовать их. В качестве награды можно раздавать брендированную одежду от партнеров и приглашать на стажировки в компании. Хакатоны и конкурсы замотивируют учащихся и предоставят компаниям новые концепции и идеи.

Таким образом, в рамках статьи были рассмотрены 5 основных инновационных подходов к управлению бизнесом в условиях цифровой трансформации и приведены примеры компаний и организаций, использовавших их. Все методы имеют как и плюсы, так и минусы и являются одними из лучших для того, чтобы компания была конкурентоспособной, и бизнес развивался в условиях новых вызовов и технологического прогресса. Проанализировав данные в таблице, мы поняли, что наиболее известные первый и второй способы, так как ими пользуется достаточно много компаний.

### Список литературы

1. Инновационные подходы к управлению бизнесом в эпоху цифровой трансформации [Электронный ресурс] - URL: <https://dzen.ru/a/ZT-Brd-WbHVwCG-V> (дата обращения: 04.01.2024).
2. Введение в data science: инструменты и методы анализа [Электронный ресурс] - URL: <https://habr.com/ru/companies/slurm/articles/768806/>
3. Искусственный интеллект и экономика: Работа, богатство и благополучие в эпоху мыслящих машин / Бутл Роджер. — Пер. с англ.— М.: Альпина ПРО, 2023. - 280-285 с.
4. Кадровая политика и цифровая безопасность в организации: учебное пособие для студентов направления подготовки 38.03.02 «Менеджмент», профиль «Бизнес-аналитика и цифровая трансформация», всех форм обучения / И. Н. Иготти. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. – 23 с.
5. Проектирование. Дизайн-мышление как способ решения задач: учебное пособие / Ю.В. Одношвина. Челябинск: ЧОУВО МИДиС, 2019. - 53 с.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ В МЕНЕДЖМЕНТЕ

В. В. Иконникова, Н. А. Руденко

*Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет*

**Аннотация.** В статье рассматриваются современные тенденции управления персоналом в менеджменте. Представлены современные инструменты управления персоналом, набирающие популярность в отечественных и зарубежных компаниях. Выявлена возрастающая роль специалистов, занимающих должности в сфере управления.

**Ключевые слова:** управление персоналом, тенденции управления, hr процессы, менеджмент.

Ключевую роль в успехе любого предприятия играет сам персонал. Верно выбранные методы управления напрямую оказывают влияние на процессы, происходящие

в организации, а также сказываются на производительности и качестве предоставляемых товаров и услуг. Методы взаимодействия с персоналом оказывают значительное влияние на атмосферу, сложившуюся в коллективе [1].

В условиях глобализации и цифровизации экономики появляется всё больше новых тенденций в управлении кадрами. Глобализация ведёт к расширению рынка труда и обострению конкуренции между предприятиями, что стимулирует поиск результативных методов управления человеческими ресурсами [2]. Цифровизация способствует расширению возможностей автоматизации процессов, а также сбора и анализа данных, обеспечивая при этом разработку инновационных методик в области обучения и профессионального развития сотрудников.

Таким образом выбор стратегии управления персоналом является важным пунктом стратегии компании, определяемый этапом ее развития, анализом внешней среды, целями и приоритетами, а также цифровой оснащённостью предприятия [3].

Необходимо осознавать, что современная структура бизнес-индустрии требует от работодателей интеграции актуальных тенденций в рамки своих операционных систем. Игнорирование новейших управленческих концепций может привести к возникновению операционных проблем у организации, включая потерю конкурентоспособности на рынке. На данный момент к современным тенденциям управления персоналом можно отнести:

#### **Использование Искусственного интеллекта.**

Искусственный интеллект (ИИ) становится всё более значимым в управлении кадрами, повышая результативность и новаторство работы специалистов по подбору персонала. ИИ способствует автоматизации монотонных процессов, улучшает механизмы найма, обучения и увольнения сотрудников, а также анализирует информацию для принятия рациональных решений.

Согласно опросу 10 тыс. россиян, который провели Авито Работа и банк для предпринимателей и предприятий Точка, по состоянию на конец 2023 года четверть (24%) российских компаний использует искусственный интеллект для выполнения тех или иных рабочих задач. Из них половина (49%) применяет технологии ИИ каждый день, а почти треть (30%) делает это 2-4 раза в неделю [4].

Использование ИИ в рабочей среде делают возможным специальные платформы. Например, система «Поток Рекрутмент» позволяет использовать искусственный интеллект в следующих целях:

- голосовой помощник для обработки входящих звонков от кандидатов;
- чат-бот для возврата соискателей в воронку и автоматический поиск резюме;
- определение уровня соответствия кандидатов на позиции, не требующие специальных навыков, методом сопоставления их анкеты с текстом объявления.

Искусственный интеллект используется не только для подбора персонала, но и в других HR-процессах.

Например, для сбора отзывов от сотрудников. Так, ИИ в системе «Поток вовлечённости» способен быстро обрабатывать подробные ответы сотрудников и определять их содержание и тон. Если бы HR-команда анализировала эти комментарии самостоятельно, это заняло бы не один час. В крупных компаниях — несколько дней.

### **Применение well being или культуры благополучия.**

Главный хирург США о психическом здоровье и благополучии в коллективах в своём докладе отметил, что 81% работников заявили, что в будущем они будут искать рабочие места, где поддерживается забота о психическом здоровье [5]. Стресс на рабочем месте становится всё более серьёзной проблемой, поэтому компании создают комфортные условия труда, отвечающие принципам культуры благополучия. Это позволяет сотрудникам снизить уровень стресса и улучшить качество своей жизни. Тем не менее стресс продолжает оказывать негативное влияние на работников, их отношения с окружающими.

Именно поэтому в структуру рабочей деятельности активно добавляют следующие факторы:

- Создание в офисе зон отдыха, с возможностью расслабиться, посетить бассейн или тренажёрный зал;
- Забота о здоровье работника, при чём как физическом, так и эмоциональном (посредством выделения путёвок на отдых, обеспечения посещения психолога);
- Эффективное распределение обязанностей, с целью не допустить перенапряжения сотрудника из-за несоразмерной нагрузки;
- Предоставление возможности повышения квалификации за счёт предприятия;
- Выстраивание доверительных отношений с сотрудниками и системы обратной связи.

### **3. Автоматизирование системы контроля подчинённых при помощи автоматической системы учёта рабочего времени CrossoverTime.**

Автоматическая система контроля даёт множество преимуществ как руководителям, так и самим работникам. Нельзя отрицать, что такой способ управления персоналом позволяет сотрудникам ощутить дополнительную ответственность, подкреплённую чувством свободы действий и улучшением доверительной связи «работник-работодатель». В свою очередь руководители могут наблюдать полную картину рабочего процесса, прилагая при этом намного меньше усилий.

Примером данной системы является инструмент для учёта рабочего времени CrossoverTime, который помогает оптимизировать рабочие процессы и улучшить производительность сотрудников. Преимуществами данной платформы является то, что её работа никак не отражается на деятельности подчинённых, благодаря ей руководитель получает всю информацию о проделанной работе, а также CrossoverTime даёт возможность объективной работы сотрудника, исключая недооценку или переоценку способностей человека. Агент CrossoverTime, установленный на ПК подчинённого, начинает сбор статистики в момент включения компьютера и продолжает вплоть до завершения сеанса работы [6]. Таким образом, данная система позволяет работодателю:

- Увидеть точное количество отработанных сотрудниками часов, причём как с компьютером, так и без него.
- Наблюдать чем и в какое время занимался сотрудник, какие программы и приложения он использовал.
- Проанализировать отчёт по программам и сайтам.

- Оценить вовлечённость каждого из участников в выполнении проекта, узнать время необходимое для выполнения задач, поставленных для реализации данного проекта.
- Получать полную информацию о графике работы, отгулах, отпуске и больничных, посредством сформированного системой табеля учёта рабочего времени.

В современных реалиях полная картина деятельности каждого работника компании становится основой для создания стратегии управления персоналом. Автоматизированный контроль даст административному персоналу возможность сосредоточиться на важных задачах, освободив время от рутинной работы. Это позволит улучшить качество принимаемых решений, повысить удовлетворённость клиентов и увеличить производительность компании.

#### **4. Развитие у сотрудников навыков многозадачности.**

Согласно исследованию разработчика голосовых и текстовых роботов Robovoice и рекрутинговой платформы HeadHunter, в Российской Федерации значительно вырос спрос на сотрудников, обладающих многозадачностью [7]. Под этим термином понимается способность работника выполнять несколько задач одновременно, быстро переключаясь между различными видами деятельности и успешно справляясь с несколькими задачами одновременно. Утверждается, что число вакансий, включающих в себя данную черту, в 2023 году возросло на 181% по сравнению с 2021 годом. На фоне этого, складывается тенденция развития данного навыка у уже имеющих работников.

Всё чаще управляющие прибегают к развитию профессиональных навыков подчинённых. Повышение квалификации сотрудников является инструментом для выполнения этой задачи, при этом важно отметить, что развитие профессиональных навыков происходит не только в основной сфере деятельности, но и в смежных областях, что расширяет функциональные возможности каждого сотрудника в компании. Процесс обучения сотрудников включает не только улучшение профессиональных компетенций, но и моральную подготовку, которая осуществляется путём постепенного распределения задач и плавного введения в новые обязанности.

Развитие навыков многозадачности у подчинённых оказывает положительный эффект на деятельность всего предприятия. Сотрудники, умеющие выполнять несколько задач одновременно, могут быстрее и эффективнее справляться с поставленными задачами и легко приспосабливаются к переменам и новым требованиям, что делает их востребованными специалистами для компаний, работающих в условиях быстро меняющегося рынка.

Подводя итог нашего исследования, можно сказать, что современные тренды управления персоналом играют важную роль в развитии организаций, поскольку они позволяют адаптироваться к изменениям внешней среды, оптимизировать расходы, учитывать потребности сотрудников и повышать их удовлетворённость работой. Следование этим трендам помогает компаниям привлекать и удерживать талантливых сотрудников, улучшать производительность и конкурентоспособность на рынке. Таким образом, актуальность и значимость современных трендов управления персоналом неоспоримы для успешного функционирования организаций в современном мире.

### Список литературы:

1. Мехтиханова, Н. Н. Управление персоналом: психологическая оценка персонала : учебное пособие для среднего профессионального образования / Н. Н. Мехтиханова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 195 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-13047-8. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/542138> (дата обращения: 03.05.2024).
2. Исаева, О. М. Управление человеческими ресурсами: учебник и практикум для вузов / О. М. Исаева, Е. А. Припорова. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 178 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-14873-2. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/537156> (дата обращения: 03.05.2024).
3. Айтмуханбетова А.С. Выбор стратегии управления персоналом // Профессиональная ориентация. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-strategii-upravleniya-personalom> (дата обращения: 03.05.2024).
4. Авито Работа и Точка: четверть российских компаний использует искусственный интеллект // Forbes URL: <https://www.forbes.ru/novosti-kompaniy/501419-avito-rabota-i-tocka-cetvert-rossijskih-kompanij-ispol-zuet-iskusstvennyj-intellekt> (дата обращения: 03.05.2024).
5. U.S. Surgeon General Releases New Framework for Mental Health & Well-Being in the Workplace // U.S. Department of Health and Human Services URL: <https://www.hhs.gov/about/index.html> (дата обращения: 03.05.2024).
6. Автоматический учет рабочего времени CrocoTime // CrocoTime URL: <https://crocotime.com/ru/> (дата обращения: 03.05.2024).
7. В России резко вырос спрос на «многостаночников» // rbc.ru URL: <https://www.rbc.ru/economics/27/11/2023/656366439a7947a415adb9f5?ysclid=lv72j77uiw154302753> (дата обращения: 03.05.2024).

## ФАКТОРЫ ВЫБОРА РАБОТОДАТЕЛЯ НА ПРИМЕРЕ СТУДЕНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Н.А.КАЛИНИНА, К.А. БОРДОШЕВА

*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

**Аннотация.** На сегодняшний день актуальной проблемой является кадровый дефицит. Цель исследования - определение критериев выбора работодателя студентами Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. В результате исследования методом анонимного анкетирования, были разработаны рекомендации для работодателей по формированию позитивного имиджа и для повышения привлекательности компании для потенциальных сотрудников.

*Ключевые слова:* кадровый дефицит, студенческая молодежь, исследование.

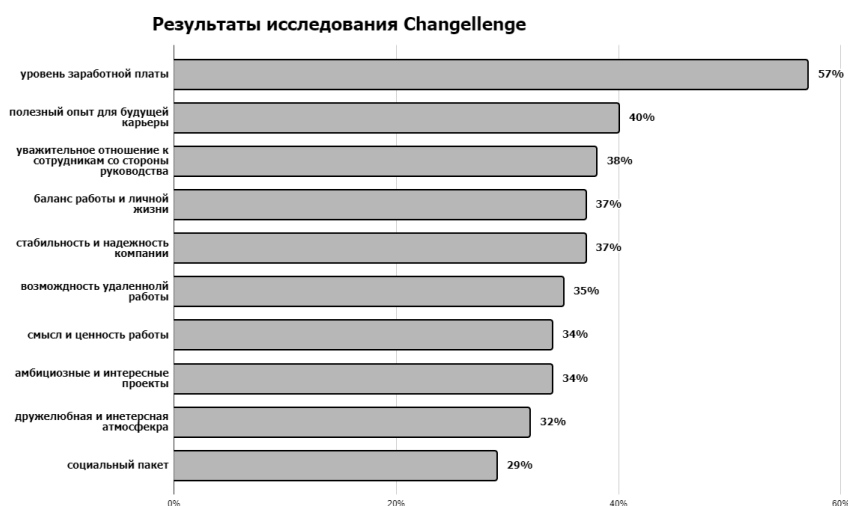
Рынок труда испытывает дефицит кадров. Достижение пенсионного возраста опытных специалистов привело к кадровому голоду, о котором работодатели говорят последние несколько лет, повлекшему за собой рекордно низкую безработицу - по данным Росстата, в 2023 году в среднем по месяцу она составляла чуть более 3%. Большинство российских работодателей (85%) считают, что дефицит кадров остается фундаментальной проблемой рынка труда в России в 2024 году, говорится в проведенном для Forbes исследовании рекрутингового сервиса HeadHunter [4].



Росстат отмечает тенденцию снижения численности населения в возрасте от 18 до 23 лет с 2013 года. За период с 2013 по 2020 год численность снизилась на 29,1%. С 2021 по 2023 год наблюдается небольшой рост (на 9,7%). В группе от 24 до 29 лет численность населения снизилась на 40,3%. В 2015 году наблюдался рост на 0,5% по сравнению с предыдущим годом. В группе от 30 до 35 лет с 2013 по 2019 год численность увеличилась на 13%. Однако затем происходит резкое падение (на 10,5% за четыре года с 2020 по 2023 год). Снижение численности молодого населения связано со сложной социально–экономической ситуацией в стране в 90-е годы XX века, что привело к снижению рождаемости. Демографические факторы играют ключевую роль в проблеме нехватки молодых кадров в стране [5]. В настоящее время все больше осознается тот факт, что каждое предприятие должно стремиться не только формировать имидж надёжного партнёра, производителя качественных товаров и привлекательного объекта для инвестиций, но и быть предпочтительным работодателем [3].

Указанная проблема обуславливает потребность в проведении исследования предпочтений и требований студентов к потенциальному месту работы. Опора на факторы, влияющих на выбор студента при трудоустройстве, играет ключевую роль в создании позитивного имиджа компании.

Платформа для роста и развития молодежи Changellenge изучила карьерные предпочтения студентов со всей России в 2022 году и выявила наиболее значимые для студентов факторы выбора работодателей (см. рис.1). Респонденты считают наиболее важным: уровень заработной платы (57%), полезный опыт для будущей карьеры (40%), уважительное отношение к сотрудникам со стороны руководства (38%). Такие факторы, как баланс работы и личной жизни, стабильность и надёжность компании выделило одинаковое количество респондентов (37%)[1].



*Рис. 1. Результаты исследования Changellenge*

По данным исследования, проведенного компанией FutureToday в январе 2024 г., наиболее важными факторами студенты выделяют: гибкий график (57%), баланс работы и личной жизни (52%) (рис. 2). Это продолжает ту тенденцию, которую мы видели ранее в исследовании Changellenge 2022г. – комфорт становится приоритетным фактором выбора работодателя[2].



Рис. 2. Результаты исследования FutureToday

В первом квартале 2024 года было проведено пилотное исследование среди студентов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (далее - СПбГМТУ). Целью исследования было определение критериев выбора работодателя для студентов этого вуза. На основе полученных данных могут быть предложены рекомендации по формированию позитивного имиджа компании и повышению её привлекательности для потенциальных сотрудников.

Для изучения предпочтений студентов СПбГМТУ была разработана анкета. В опросе приняли участие 41 студент (56% женщин и 44% мужчин) в возрасте от 19 до 35 лет, обучающихся по следующим формам обучения: бакалавриат, специалитет и магистратура, также были учтены все направления обучения СПбГМТУ. Большинство респондентов совмещают учёбу с работой (73%), что делает полученные результаты исследования актуальными и практичными для разработки рекомендаций работодателям.

Результаты опроса студентов СПбГМТУ показали, что наиболее важными факторами являются уровень заработной платы (66%), официальное трудоустройство (63%), компетентность руководителя (59%), стабильность компании на рынке (54%) и интересные задачи и проекты (49%) (Рис. 3).

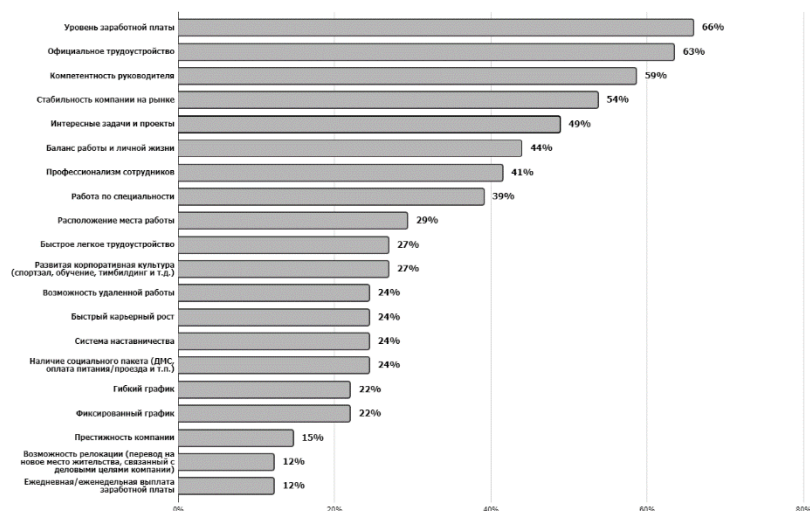


Рис. 3. Результаты исследования опроса студентов СПбГМТУ

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

На основе вышеуказанных исследований можно разработать следующие рекомендации работодателю, желающему улучшить свой имидж в глазах студентов:

1. Установить конкурентоспособный уровень заработной платы, соответствующий рыночным стандартам и ожиданиям кандидатов.
2. Уделить внимание развитию профессиональных навыков руководителей, организовать обучение и повышение квалификации для менеджеров среднего и высшего звена.
3. Предлагать интересные и разнообразные задачи и проекты, способствующие профессиональному росту сотрудников и получению удовольствия от работы.
4. Создать комфортные условия работы, учитывая баланс между работой и личной жизнью, а также стабильность и надежность компании.
5. Создать возможность выбора графика работы, онлайн и офлайн присутствия на рабочем месте, позволяющий сотрудникам быть мобильными.

Решение вопроса кадрового дефицита является актуальным. Работодателям важно, учитывая потребности потенциальных соискателей, вызывать и поддерживать их заинтересованность. Благодаря пилотному исследованию, были выявлены наиболее значимые факторы, на которые больше всего обращают внимание соискатели-студенты СПбГМТУ, а также разработаны рекомендации работодателям для их большей привлекательности при поиске работы. В дальнейшем возможно проведение масштабного исследования, охватывающего большее количество респондентов для более глубокого анализа.

### Список литературы

1. Исследование Changellenge - 2023г. - URL: <https://changellenge.com/tpage/bca-2022-results/> (дата обращения - 14.04.2024).
2. Исследование FutureToday - 2023г. - URL: <https://neohr.ru/kak-vybirayut-rabotodateley> (дата обращения - 14.04.2024).
3. Колесова М. Ф. Сущность и значение бренда работодателя // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2017г. – Т. 39. – С. 1711–1715. – URL: <http://e-koncept.ru/2017/970669.htm> (дата обращения - 14.04.2024).
4. Липанова Л. “Большинство работодателей в России считают дефицит кадров главной проблемой 2024 года” – URL: <https://www.forbes.ru/svoi-biznes/501872-bol-sinstvo-rabotodatelej-v-rossii-scitaut-deficit-kadrov-glavnoj-problemoj-2024-goda> (дата обращения - 14.04.2024).
5. Стельмашенко О.В., Елина Ю.А. Проблема дефицита молодых специалистов на рынке труда Российской Федерации // "Экономика и социум" №10(113) - 2023 г. - URL: [https://www.iupr.ru/\\_files/ugd/b06fdc\\_2a4a010c2c044cb99b3276918258176d.pdf?index=true](https://www.iupr.ru/_files/ugd/b06fdc_2a4a010c2c044cb99b3276918258176d.pdf?index=true) (дата обращения - 14.04.2024).

## КЛАССИФИКАЦИЯ ИНВЕСТИЦИЙ КАК ДВИЖУЩИЙ ФАКТОР РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ

КАСАТКИН Д.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** В статье рассматривается как экономическая, так и правовая сущность классификации инвестиций. Приводятся примеры наиболее эффективной классификации по экономическим основаниям. Также выработана новая классификация исходя из объектов правового регулирования,

устанавливаемых нормативно-правовыми актами российского законодательства. Сочетание правовых и экономических критериев в классификации инвестиций позволит добиться как их экономической эффективности, так и правовой защищённости.

*Ключевые слова: инвестиции, классификация инвестиций, инвестиционная деятельность.*

## **Введение**

Инвестиции в современной экономике играют определяющее значение для начинания любых проектов, от развития небольшого стартапа до реализации инновационного проекта в крупной компании. Без привлечения финансирования невозможна никакая экономическая деятельность. Даже в условиях плановой экономики так или иначе, государство инвестировало в производственные процессы. В рыночной экономике имеется намного больше источников привлечения денежных средств, что обуславливает необходимость их классификации, которая позволит эффективнее получать финансирование при реализации и коммерциализации инновационных проектов.

Классификация инвестиций важна не только с экономической, но и с правовой точки зрения. В сфере экономики классификация инвестиций появилась давно и развивается долгое время, тогда как в сфере права российское законодательство достаточно молодо и содержит одно лишь определение понятия инвестиции в пяти различных федеральных законах.

Для наиболее эффективного развития инновационной экономики инвестиционная деятельность должна иметь сходное толкование как в экономической теории, так и в законодательстве, которое должно опираться на данные исследования при правовом регулировании.

## **Классификация инвестиций по экономическим основаниям**

Инвестиции с точки зрения экономики классифицируются по самым различным основаниям. Так, например, они делятся по объекту на реальные и финансовые. Первая группа предполагает вложения в реальные активы компаний или предприятий, т.е. в напрямую в их инновационные проекты, а вторая группа предполагает денежные вложения посредством покупки ценных бумаг. В целом реальные инвестиции предлагается определять, как все вложения, которые не относятся к финансовым. Реальные инвестиции отличаются от финансовых тем, что все они направлены в итоге на улучшение деятельности компании, увеличение производительности или дохода [1]. Финансовые инвестиции предполагают лишь покупку ценных бумаг, которые в случае покупке на фондовой бирже в большинстве своём имеют в качестве цели только перепродажу по более высокой стоимости.

Реальные инвестиции также подвергаются подробной классификации. Так, их делят на материальные и потенциальные. Первая группа инвестиций направлена на инвестиции в производство и производственную информацию. Такие инвестиции делятся на: стратегические, основные, текущие и инновационные. Вторая группа вложений направлена на инвестиции в нематериальные активы, например, в повышение квалификации персонала [2].

По объекту инвестиции делятся также на прямые и портфельные. Первая группа инвестиций представляет собой частную разновидность реальных инвестиций, когда приобретатель ценных бумаг получает более десяти процентов от доли в одной компании. Вторая группа представляет под собой пассивные инвестиции, когда осуществляются вложения в несколько компаний. Однако, противопоставлять две группы данных

инвестиций не стоит, поскольку, например, прямые инвестиции вполне могут быть частью портфельных [3]. Прямые инвестиции не обязательно исключают инвестиции портфельные. Многие значимые инвесторы и инвестиционные фонды имеют как часть своих портфелей более 10% доли в одной компании.

Инвестиции также делятся по срокам осуществления. Их принято разделять на краткосрочные и долгосрочные. Однако, научная и учебная литература этими критериями не ограничивается, и каждый автор предлагает свою классификацию, вводя такие новые термины как сверхкраткосрочные или сверхдолгосрочные инвестиции, что не подкреплено ни исследованиями, ни экономическим обоснованием. Наиболее предпочтительной является точка зрения, что по срокам необходимо выделять только долгосрочные и краткосрочные инвестиции. Ко вторым необходимо относить финансовые инвестиции сроком до одного года, к первым же можно относить все остальные инвестиции как финансовые сроком более года, так и реальные. При необходимости более детального разделения долгосрочных инвестиций с целью анализа и учёта можно выделять двухлетние, пятилетние и десятилетние инвестиции [4].

Инвестиции выделяют в зависимости от территории как внутренние и иностранные. По уровню риска выделяют инвестиции безрисковые (фактическая доходность гарантирована), инвестиции с низким уровнем риска-капиталовложения (риск ниже среднего уровня), среднесрочные (риск эквивалентен среднему по рынку), высокорисковые (риск выше среднего), спекулятивные (наиболее рискованные, например, в капитал молодых компаний, не имеющих прибыли) [5]. Классификация вложений по уровню риска является не самой оптимальной, поскольку при подобном разделении не анализируется, например, рыночный цикл в экономике. В определённые кризисные периоды все инвестиции могут относиться к высокорисковым, а когда экономика растёт, то спекулятивные инвестиции могут оказаться как самыми выгодными, так и самыми безопасными.

Таким образом, классификация инвестиций по экономическим основаниям имеет обширный перечень факторов, каждый из которых играет определённую роль в понимании инвестиций. Однако, можно говорить о том, что чёткие критерии для обобщения имеют только реальные и финансовые, имеющие разные объекты воздействия капиталовложений.

### **Классификация инвестиций по правовым основаниям**

Для обеспечения стабильности инвестиционного процесса необходимым условием является понимание законодательного регулирования инвестиционного процесса. В российском праве нет однозначно установленного определения понятия инвестиции. Они определяются по-разному в зависимости от сферы регулируемых правоотношений. Так, инвестиции регулируются пятью законодательными актами: Федеральный закон от 25.02.1999 № 39-ФЗ "Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений", Федеральный закон от 01.04.2020 № 69-ФЗ "О защите и поощрении капиталовложений в Российской Федерации", Федеральный закон от 09.07.1999 № 160-ФЗ "Об иностранных инвестициях в Российской Федерации", Федеральный закон от 5 марта 1999 г. № 46-ФЗ "О защите прав и законных интересов инвесторов на рынке ценных бумаг", Федеральный закон от 02.08.2019 № 259-ФЗ "О привлечении инвестиций с использованием инвестиционных платформ и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации", "Бюджетный кодекс Российской Федерации" от 31.07.1998 № 145-ФЗ.

Приведённые нормативно-правовые акты по объекту правового регулирования можно разделить на несколько групп. Первой группой будут являться два первых закона, поскольку они содержат также единое определение инвестиций как денежных средств и иного имущества, имущественных и иных прав, которые имеют денежную оценку и вкладываются в объекты деятельности для получения прибыли или иных полезных эффектов. Третий законодательный акт имеет объектом правового регулирования отношения на рынке ценных бумаг и подразумевает под инвестициями только лишь эмиссионные ценные бумаги. Четвёртый законодательный акт даёт определение иностранным инвестициям как вложение иностранным инвестором объектов гражданских прав в объект предпринимательской деятельности на территории России. Пятый закон определяет инвестиции как приобретение посредством денежных средств ценных бумаг или цифровых прав для получения прибыли. Бюджетное законодательство понимает под инвестициями исключительно вложения в стоимость государственного или муниципального имущества.

Таким образом, по объекту правового регулирования инвестиции можно разделить на четыре группы: инвестиции в основной капитал (№ 39-ФЗ, № 69-ФЗ), иностранные инвестиции (№ 160-ФЗ), инвестиции в сфере купли-продажи ценных бумаг (№ 46-ФЗ, № 259-ФЗ), бюджетные инвестиции (№ 145-ФЗ). Подобная классификация позволит чётко разграничивать правовое регулирование различных инвестиционных отраслей, что способствует стабильности и определённости гражданского оборота.

### **Заключение**

Инвестиционный процесс является сложным как с экономической, так и с правовой точки зрения явлением, в котором необходимо грамотное понимание как целесообразности вложений с точки зрения сроков, объёма и вероятности получения прибыли, так и с определённой правовой защитой вложенных средств.

На основании изложенного в работе можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время имеется множество классификаций инвестиций. Наиболее характерно экономическую природу инвестиций отражают классификации: по объекту инвестирования, по срокам осуществления, по территории осуществления, по риску получения прибыли.

2. Классификация инвестиций исходя из объекта правового регулирования российского законодательства является важной для определённости правовой защиты инвестиций. Объект правоотношений позволяет определить применимый закон, что даёт возможность просчитать также правовые риски инвестиционной деятельности в той или иной сфере.

### **Список литературы**

1. Шпинев Ю.С. Классификация инвестиций: реальные и финансовые // Проблемы экономики и юридической практики. 2021. Т. 17. № 6. С. 69-74
2. Ялмаев Р.А., Джабраилова Л.Х., Ахмедова З.А. Экономическая сущность и классификаций инвестиций // Естественно-гуманитарные исследования. 2021. № 34 (2). С. 254-257.
3. Шпинев Ю.С. Классификация инвестиций // Проблемы экономики и юридической практики. 2020. Т. 16. № 1. С. 109-112.
4. Шпинев Ю.С. Классификация инвестиций по срокам: краткосрочные и долгосрочные // Пробелы в российском законодательстве. 2021. Т. 14. №4. С. 229-235.
5. Сафиуллин М.Р., Абдуллина А.Р. Сущность инвестиций и их классификация // Научные труды Центра перспективных экономических исследований. 2019. № 16. С. 33-45.

## ТРЕНДЫ В ЛОГИСТИКЕ: ШАГ К УСТОЙЧИВОМУ БУДУЩЕМУ ЧЕРЕЗ ЗЕЛЕНУЮ ЛОГИСТИКУ

ТАМБОВЦЕВА В.В., КРАВЧЕНКО В.Д., ФОМИНА И.Г.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Данная статья рассматривает актуальную тему для современного мира: зеленая логистика. В тексте будут затронуты понятия, направления и примеры упомянутого выше тренда. Для полного осознания важности зеленой логистики в статье представлены графики, демонстрирующие уровень вреда наносимого окружающей среде современными методами логистики.

*Ключевые слова:* логистика, экологи, зеленые технологии

Зеленая логистика - это тренд, направленный на устойчивое развитие компаний в области транспортировки, хранения и энергопотребления с минимальным вредом для окружающей среды.

Ниже представлена статистика, демонстрирующая уровни загрязнения воздуха за последние 17 лет [1].

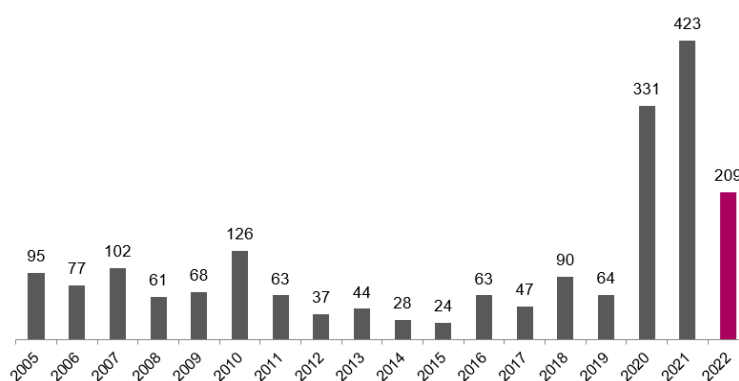


Рис. 1. Количество случаев высокого и экстремального загрязнения воздуха с 2005 по 2022 гг.

Количество загрязнений за последние годы достигал пугающих значений. Тем не менее, можно заметить, что в 2022 году произошло снижение выбросов. Это во многом связано с активным внедрением зеленых логистических решений на предприятия.

Основными источниками загрязнений являются:

- индустриализация
- рост населения
- энергетический сектор
- транспортная отрасль

Большинство случаев опасных выделений в атмосферу за 2022 год пришлось на бензопирен, высокие концентрации этого вещества были зафиксированы 88 раз (рис.2). Данный канцероген образуется при сгорании твердых и жидких органических веществ, его основным источником являются табачный дым, асфальт и автомобильный транспорт.



Рис. 2. Распределение случаев высокого и экстремально высокого загрязнения воздуха по химическим средствам

К каким же методам прибегают компании, чтобы снизить свой экологический след? Во многом это зависит от типа бизнеса и отрасли, тем не менее наибольшей популярностью пользуются следующие тренды [2]:

- Прогнозирование спроса
- Альтернативные источники энергии в хранении
- Экологичная упаковка

При правильном прогнозировании спроса будет произведен необходимый объем продукции, что в будущем не приведет к ситуации с утилизацией излишек или довозкой дополнительных изделий. Хорошее планирование помогает сократить издержки и объем выбросов вредных веществ. Для прогнозирования спроса существуют специальные отраслевые решения – Forecast NOW и 1С: Транспортная логистика.

К экологичной упаковке относятся изделия, которые произведены из вторичного сырья, могут быть переработаны и использованы повторно. Такая упаковка сокращает использование нефтепродуктов и других невозобновляемых ресурсов, а также не наносит вреда здоровью человека и окружающей среде, что является несомненным преимуществом. Важные критерии такой упаковки – это возобновляемость сырья, а именно возможность возмещения ресурса природе, и безопасность. Экологической упаковкой может считаться только такая, которая не будет вредить человеку, соответственно не будет выделять вредных веществ при нагревании и разложении. Также возрастает популярность использования вторичного сырья для упаковки товаров. Это более экологично, нежели тратить на изготовление новые ресурсы.

Альтернативные источники энергии в хранении предполагают переход на более эффективные и экологичные холодные и кондиционерные системы. Ранее более популярные синтетические хладагенты на фреоне заменяются компаниями на альтернативные хладагенты, например, нетоксичный и доступный диоксид углерода. Немецкая компания Metro AG, имеющая в своем управлении сеть магазинов мелкооптовой торговли, в 12 точках на территории России уже завершила переход с использования фреона на более экологичные альтернативы в холодильных установках [3]. Несмотря на популярность использования фреона в холодильниках, данный газ разрушительно воздействует на озоновый слой Земли. Разрушение озонового слоя, в свою очередь, негативно влияет на здоровье человека, повреждает растения, а также негативно влияет на климат. Важно отметить, что замена оборудования также повысила уровень энергоэффективности систем: компания отметила, что использование альтернативных хладагентов уменьшает расход электроэнергии на 30%.



Для популяризации трендов в зеленой логистике регулярно проводятся различные мероприятия: конференции, круглые столы и т.д., в ходе которых между компаниями могут быть заключены соглашения о взаимовыгодном сотрудничестве.

Так, например, представители компаний РУСАЛ и «ТрансКонтейнер» подписали соглашения о стратегическом сотрудничестве в целях низкоуглеродного развития в сфере логистики [5]. Известно, что компания РУСАЛ занимается постепенным снижением углеродного следа еще с 2007 года. Углеродный след является глобальной проблемой, так как приводит к увеличению температуры Земли, что негативно сказывается на погодных условиях, океанах и биологическом разнообразии. Россия входит в пятерку стран с наибольшим углеродным следом, поэтому подобные соглашения – важный шаг в направлении по достижению нулевого баланса выбросов парниковых газов.

Также развитие энергетики на основе возобновляемых или альтернативных источников помогает существенно снизить негативное воздействие логистики на окружающую среду. В данной сфере соглашение о поставке международных сертификатов возобновляемой энергии I-REC подписали En+ Group и «ТрансКонтейнер». В сертификатах отражено, что электроэнергия произведена из возобновляемых ресурсов. Подобное соглашение, отражающее прозрачность проверки снижения углеродного следа на всех этапах цепи поставок, – это значительный шаг к устойчивому будущему по достижению нулевых выбросов парниковых газов.

Однако, даже не смотря на очевидную пользу в применении зеленых технологий, все еще существует ряд ограничивающих факторов. В первую очередь, высокая стоимость внедрения ресурсосберегающих технологий. Это вынуждает малые и средние компании откладывать интеграцию зеленых технологий в производство, складирование и перевозку товаров, так как значительную выгоду можно получить только в долгосрочной перспективе. Также, препятствием может быть недостаток стандартов и регулирования в отрасли зеленой логистики. В большинстве ГОСТов и стандартов на данный момент не включены экологические требования и нормы, направленные на конечного потребителя. Слаборазвиты и методики по применению зеленых технологий в компаниях.

## Список литературы

1. Количество высоких загрязнений воздуха в 2022 году сократилось в 2 раза / [Электронный ресурс] // finexpertiza : [сайт]. — URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2023/zagr-vozd-22-sokrat/>
2. Как развивается «зеленая» логистика в России / [Электронный ресурс] // РБК Тренды : [сайт]. — URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/62b163609a79478f636eebeb>
3. К 2036 году все ТЦ Metro в РФ перестанут использовать фреон / [Электронный ресурс] // retail.ru : [сайт]. — URL: <https://www.retail.ru/news/k-2036-godu-vse-tts-metro-v-rf-perestanut-ispolzovat-freon-9-fevralya-2024-237541/>
3. Холодильное оборудование на CO2 позволяет экономить / [Электронный ресурс] // Холодильная индустрия : [сайт]. — URL: <https://holodcatalog.ru/entsiklopedii/novye-tehnologii-v-kholodilnoy-otrasli/kholodilnoe-oborudovanie-na-so2-pozvolyaet-ekonomit/>
3. «Зеленая» логистика: новый тренд на уровне топ-менеджеров / [Электронный ресурс] // Стратегический журнал : [сайт]. — URL: <https://strategyjournal.ru/ekonomika-i-biznes/zelenaya-logistika-novyj-trend-na-urovne-top-menedzherov/>

## ЗЕЛЁНАЯ ЛОГИСТИКА

БЫЧКОВ В.М., ОСАУЛЕНКО Т.А., КУЗЬМИН Н.П.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В статье рассматриваются методы внедрения зелёной логистики, имеется обоснование актуальности данной темы, а также представлен пример успешной реализации зелёной логистики в крупной логистической компании.

*Ключевые слова:* зелёная логистика, окружающая среда, логистические операции, транспорт, загрязнение, утилизация, отходы, упаковка, СДЕК.

В современном, динамично развивающемся мире большинство товаров отправляются через курьерские службы, доставки и прочие организации, общий грузооборот которых более 50 трлн. тонно-километров. Все эти поставки осуществляются водным, наземным или воздушным транспортом. Очевидно, что транспорт, задействованный в логистических операциях в ходе эксплуатации, выбрасывает в атмосферу множество вредных веществ, негативно сказывающихся на экологии и жизни людей. Из-за чего мероприятия, направленные на сохранение окружающей среды, набирают всё больше популярности, одно из них - зелёная логистика.

Зелёная логистика - это подход, который стремится уменьшить влияние логистических операций на окружающую среду.

За 2022 год, согласно оценке экспертов, ущерб от логистических операций составил 112% по сравнению с предыдущим годом. Если же обратиться к конкретным показателям, то 60% загрязнения атмосферы приходится на логистические операции, также было выброшено 35,6 млн кг полиэтиленово-картонной упаковки и только 82,5% её было утилизировано. Шумовое загрязнение выросло на 28% - все эти показатели говорят о том, что экология ежегодно ухудшается, а количество отходов, вредных веществ, выброшенных в окружающую среду, увеличивается.

Рассматривая проблему экологии на примере РФ, можно сказать, что уже введены меры по борьбе с последствиями логистических операций: использование многоразовой упаковки, внедрение системы управления отходами, сделан акцент на выбор сырья и технологию производства, внедрена организация и координация процессов утилизации и переработки отходов. Однако можно отметить, что полное внедрение зелёной логистики - это процесс, требующий большого финансирования и соответствующих технологий, большинство которых в настоящий момент ещё находятся в стадии разработки.

Примером организации, которая успешно реализует проекты по внедрению зелёной логистики может послужить СДЕК. Компания осуществляет доставку не только на территории РФ, но и за её пределами - в Беларуси, Киргизии, Казахстане, Азербайджане, Узбекистане, ОАЭ, Китае и Вьетнаме. За 20 лет своего существования СДЕК успел не только реализовать множество проектов, направленных на улучшение качества и скорости поставок, но и позаботился о сохранении экологии: компания отказалась от цветной печати, осуществила переход от деревянных паллет к многооборотным контейнерам, организовала пункты для сборов и переработки отходов, перевела на энергосберегающее освещение крупные филиалы, курьерские бюро и сортировочные центры, а также запустила производство лимитированной коллекции непромокаемых плащей из переработанной упаковки, тем самым призывая обратить внимание на необходимость сохранения окружающей среды.



Рис. 1. Непромокаемые плащи из переработанной упаковки от СДЕК

### Список литературы.

1. Как развивается «зеленая» логистика в России [Электронный ресурс]. - URL: <https://trends.rbc.ru/trends/green/62b163609a79478f636eebeb> (дата обращения: 05.03.2024).
2. Упаковка, дождевики и брелоки: экологический проект СДЭК [Электронный ресурс]. - URL: <https://vc.ru/cdek/467984-upakovka-dozhdeviki-i-breloki-ekologicheskiiy-proekt-sdek> (дата обращения: 05.03.2024).
3. Экологическая логистика – управление продуктами и транспортом в интересах сохранения окружающей среды [Электронный ресурс]. - URL: <https://logists.by/blog/ekologicheskaya-logistika-upravlenie-produktami-i-transportom-v-interesah-sohraneniya-okruzhayushey-sredy> (дата обращения: 05.03.2024).

## ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ЮРИДИЧЕСКИ ЗНАЧИМОГО ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В ВУЗАХ

ЛЫСЕНКОВА А.М.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

**Аннотация.** Статья рассматривает проблемы и перспективы внедрения юридически значимого электронного документооборота в университетскую среду. Описываются основные проблемы, такие как правовая неопределенность и безопасность данных, а также перспективы и подготовка к внедрению безбумажного документооборота.

**Ключевые слова:** электронный документооборот, юридически значимый документооборот, смешанный документооборот, ЭДО в университетах.

Информационные технологии тесно интегрировались в нашу повседневную жизнь, что отразилось как в сфере государственного управления, так и в работе организаций различных форм собственности. Электронные документы приобрели широкое применение благодаря ряду преимуществ: ускоренным процессом обработки документов, возможностью их электронной передачи, легкостью в редактировании, бесконечным хранением и отсутствием ограничений в количестве экземпляров с юридической значимостью [1].

Электронный документооборот (ЭДО) отличается от традиционного понимания обработки документов за счет использования технических и программных средств,

управления всеми форматами документов (включая как бумажные, так и электронные), автоматизации всех этапов документооборота как внутри, так и вне организации, а также охвата более широкого спектра информации. Однако, основной сложностью ЭДО является обеспечение юридической значимости электронных документов [2].

Организовать передачу цифровых документов позволяет юридически значимый электронный документооборот (ЮЗЭДО, ЮЗДО или ЮЗЭД). Под ЮЗЭДО понимают систему обмена электронными документами через интернет между двумя контрагентами, работодателем и сотрудниками, компанией и государственными органами. Этот процесс в основном аналогичен обычному обмену бумажными документами, за исключением того, что он осуществляется в цифровой форме. Документы, созданные и переданные через ЮЗЭДО, обладают той же юридической силой, что и их бумажные аналоги [3].

В университетах значительная часть документации связана с движением контингента обучающихся. Эти документы, вместе с основными приказами, формируют обширную группу, которая по-прежнему требует бумажного оформления из-за недостаточно развитых электронных архивов на государственном уровне. Они на десятилетия уходят в архив университета, в значит, должны быть подписаны собственноручной подписью ректора или проректора университета.

В вузе часто случаются процессы, которые могут вести к увеличению числа документов. Например, в случае возникновения процессов реорганизации, увеличения числа студентов, расширения активностей и программ, изменений в законодательстве и т.д., возникает еще больше документов, связанных с учетом абитуриентов, студентов и сотрудников, включая приказы о зарплатах, назначении стипендий, отпусках, зачислений и отчислений, программ дисциплин и многое другое. Чем больше филиалов, подразделений и корпусов, тем больше таких приказов требуется [4].

Переход к полному ЮЗЭДО в университете может быть сложным, так как важно учитывать множество факторов, включая безопасность данных, бюджет вуза, особенности документооборота в учебном заведении и понятности процесса перехода для всех участников университетской среды (таблица 1).

#### Проблемы внедрения ЮЗЭДО в вузах

Проблема	Причина
Отсутствие финансирования и специалистов СЭД	Бюджет университета ограничен, при привычном документообороте не нужно выделять средства на СЭД и специалистов.
Непринятие персоналом нововведений	Сложность освоения системы, опасения по поводу прозрачности деятельности, нежелание переходить с привычного формата документооборота.
Уязвимость информации и взломы	Возможность взлома и несанкционированного доступа к электронной информации.

Современные технологии позволяют организовать полностью безбумажный обмен документами, однако на практике электронные версии документов часто используются лишь как альтернатива их бумажным копиям [5].

Для решения проблем необходимо рассмотреть виды документооборота. Автоматизацию документооборота можно условно подразделить на четыре вида: бумажный документооборот, бумажный документооборот с использованием автономных ПК, смешанный документооборот и безбумажный документооборот (таблица 2).

Таблица 2

**Виды документооборота**

Вид документооборота	Характеристика	Достоинства	Недостатки	Юридическая значимость
Бумажный	Все этапы осуществляются в бумажной форме.	Простота и понятность процесса для сотрудников.	Затраты на печать, хранение и обработку.	Официальная юридическая сила.
Бумажный с использованием автономных ПК	ПК используются для подготовки и регистрации документов, согласование и утверждение происходят в бумажном виде.	Возможность использования компьютеров для облегчения процесса работы с документами.	Ограниченная эффективность из-за необходимости перевода документов в бумажный формат для согласования и утверждения.	Бумажный формат - официальная юридическая сила, электронные документы - нет.
Смешанный	Компьютеры в локальной сети используются для подготовки, передачи и хранения документов, согласование и утверждение происходят в бумажном виде.	Улучшение эффективности за счет компьютеризации процесса и использования локальной сети для передачи и хранения документов.	Необходимость сохранения бумажных версий для официального использования в силу отсутствия полной правовой значимости электронных документов.	Бумажный формат - официальная юридическая сила, электронные документы - при соблюдении определенных требований.

*Продолжение таблицы 2*

Безбумажный	Все этапы осуществляются исключительно в электронном формате, без использования бумажных носителей.	Сокращение затрат на печать, хранение и обработку бумажных документов. Увеличение эффективности и скорости обработки документов.	Трудности с принятием новой технологии среди персонала. Возможность технических сбоев или утечек данных.	Электронные документы обладают официальной юридической силой при соблюдении определенных требований.
-------------	---	--	--	--

В настоящее время большое внимание уделяется внедрению современных технологий для улучшения образовательного процесса, что включает в себя создание системы поддержки обучения и системы управления учебными заведениями, а также инструменты для анализа образовательной информации. Чтобы эти системы работали эффективно, необходимы соответствующие технологические решения. Именно поэтому вновь возникает проблема в переводе документов в электронную форму и переходе на электронный документооборот [6].

Выбор формата для документооборота должен учитывать не только технические возможности, но и юридическую значимость. Переход от бумажного к электронному документообороту предполагает решение множества задач, начиная от обеспечения безопасности данных, активного вовлечения специалистов и заканчивая обучением персонала. Кроме того, переход должен быть плавным, чтобы внутренние процессы университета постепенно смогли подстроиться под новую систему.

Внедрение ЮЗЭДО в вузе открывает перспективы улучшения эффективности управления и сокращения времени на обработку документов. Грамотный выбор

технологических решений, учет юридических аспектов и адаптация к особенностям организации помогут успешно внедрить ЭДО и реализовать его потенциал в университетской среде.

Выбор смешанного документооборота для университета представляется наиболее оптимальным. Этот подход обеспечивает плавный переход к электронным технологиям, сохраняя при этом юридическую силу документов и учитывая особенности университетской среды. При смешанном документообороте университеты могут постепенно внедрять электронные решения, повышая эффективность процессов без риска нарушения традиционных рабочих процессов. Такой подход способствует адаптации к современным технологиям, сохраняя при этом устоявшиеся практики и обеспечивая соответствие законодательству, тем самым подготавливая учебное заведение к переходу на полностью безбумажный документооборот.

### Список литературы

1. Шевченко Игорь Юрьевич, Пашкова Елена Юрьевна Преимущества и проблемы применения системы электронного документооборота в организациях // Ученые записки Алтайского филиала Российской академии народного хозяйства при Президенте Российской Федерации. 2023. №1 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-problemy-primeneniya-sistemy-elektronno-go-dokumentoooborota-v-organizatsiyah> (дата обращения: 01.05.2024).
2. Ларин М.В. Управление документацией и новые информационные технологии. - М., 2011. - 137 с.
3. Юридически значимый электронный документооборот (ЮЗЭДО) // Контур.Диалок URL: [https://www.diadoc.ru/articles/44466-yuridicheski\\_znachimyy\\_elektronnyy\\_dokumentoooborot](https://www.diadoc.ru/articles/44466-yuridicheski_znachimyy_elektronnyy_dokumentoooborot) (дата обращения: 01.05.2024).
4. Музычкин П.А. Опыт использования усиленной электронной подписи при согласовании приказов // Открытое образование. 2017. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-ispolzovaniya-usilennoy-elektronnoy-podpisi-pri-soglasovanii-prikazov> (дата обращения: 09.05.2024).
5. Полиновский В.В. Внедрение системы электронного документооборота в научной организации / В.В. Полиновский, М.И. Огурцов // Вестник Хмельницкого национального университета. – 2010. – С. 117-123.
6. Соколова Д.Ю. Проблемы и перспективы состояния современного документооборота // Перспективы развития информационных технологий. 2016. №28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-sostoyaniya-sovremennogo-dokumentoooborota> (дата обращения: 01.05.2024).

## ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

С.А. МОРДВИНОВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ  
им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Информация, используемая на предприятии для принятия решений по различным направлениям деятельности, должна базироваться на одних и тех же данных, обеспечиваться необходимой степенью детализации, надежно храниться, предоставлять сведения об истории возникновения. На принципе единого хранилища данных строятся системы планирования ресурсов предприятия (ERP-системы). В статье рассмотрены подходы по порядку принятия решения о выборе ERP-системы и ее внедрении, предложены этапы выбора поставщика, оценки стоимости внедрения и владения системой. Выбору конкретной системы и конфигурации предстоит постановка задач, которые должна решать система, и формулирование конкретных требований к выходной информации, формируемой в системе. В работе определены основные преимущества, получаемые предприятием с внедрением ERP-системы, и причины, по которым предприятия во всем мире стремятся к внедрению ERP-систем.

*Ключевые слова:* ERP-системы, планирование ресурсов, выбор поставщика, этапы внедрения.

Современные корпоративные информационные системы (далее – КИС) лежат в основе развития экономики. Информация используется при принятии решений, важно, чтобы она основывалась на одних и тех же данных, которые при необходимости можно было детализировать. Для этого в наше время российские организации активно внедряют ERP-системы (Enterprise Resource Planning Systems). Целями внедрения и использования ERP-системы является формирование актуальной производственной, управленческой и финансовой информации для полного удовлетворения внутренних потребителей данными для анализа информации и принятия управленческих решений и удовлетворения потребностей клиентов компании. Одна из задач ERP-системы состоит в связывании всего персонал и его действия в единое целое в конкретный момент времени [1, 2, 4] и получение информации о происходящих на предприятии процессах в режиме реального времени.

ERP-решения основаны на создании централизованной базы данных, которая содержит всю деловую информацию. Это единое хранилище данных обеспечивает доступ к информации для любого количества сотрудников предприятия в соответствии с их правами доступа.

При принятии решения о внедрении ERP-системы следует учитывать, что это система строится на процессном управлении, подразумевает переосмысление существующих процессов, и их возможную трансформацию под алгоритмы системы. Каждая система, представленная на рынке, обладает определенными функциональными возможностями, и следует понимать, что универсальной системы, которая подходит каждой компании не существует. Специалистам по ERP-системам необходимо иметь поддержку и активное участие высшего руководства, составить четкий подробный список требований прежде чем искать поставщиков, оценить требования и возможность мобильного использования системы, оценить варианты прежде, чем сделать выбор, иметь возможность управлять организационными изменениями, получить необходимое время и ресурсы на обучение в ERP-системе, заручиться поддержкой поставщика, оценить стоимость владения (приобретения и эксплуатации) [7].

Выбору конкретной системы и конкретной конфигурации предстоит описание задач, которые должно решить внедрение системы и какие преимущества система даст предприятию [3]. Следует сформулировать требования к ERP-системе: какие функциональные области она должна охватывать, какие программно-технические платформы использовать, какие отчеты готовить и др. На этапе определения потребностей важно обозначить текущие и четко описать будущие потребности бизнеса. Требования фиксируются в виде документа, где все требуемые параметры ERP-решения описаны в порядке убывания важности. На предварительной стадии также важно правильно проанализировать технологическую базу предприятия.

Оценивая систему необходимо смотреть не только на возможности самой системы. Следует учитывать надежность разработчика, технологию в основе продукта, обеспечивающую возможность расширить функциональность системы, долю рынка, которая охвачена этой системой, стабильный программный код, широкий выбор модулей, простота в использовании. Фирму-разработчика следует оценивать исходя их продолжительности работы на рынке, количества успешных внедрений с одновременным знакомством с реализацией проектов внедрения на предприятиях. Важно выбрать правильного партнера для внедрения ERP-системы, который станет не просто поставщиком программного обеспечения, а долгосрочным партнером предприятия.

Принятию решения должна предшествовать оценка стоимости внедрения и владения системой. В стоимость внедрения – расходы на IT-инфраструктуру предприятия и услуги фирмы-разработчика. Стоимость владения – это стоимость лицензий, а также стоимость расходов на обучение персонала компании и сопровождение системы. Таким образом расходы складываются из расходов на покупку, внедрение, сопровождение и развитие. Внедрение ERP-системы должно рассматриваться как обоснованное инвестиционное решение.

Выделяют следующих основных этапов внедрения ERP-системы [2, 3, 5, 7]:

- выявление и анализ информационных потоков на предприятии, создание базы основной нормативной документации, определение недостающих первичных документов, нормативной документации и т. д.;

- разработка модели предприятия посредством описания подлежащих автоматизации бизнес процессов, их построения и оптимизации;

- формирование справочников и классификаторов системы: этот этап является важным требованием ERP-системы, необходимо на каждом этапе и в любом подразделении важно использовать единые классификаторы и стандарты продукции, товаров и материалов, справочники контрагентов, основных хозяйственных операций и др.

- разработка детального плана проекта внедрения, включая распределение обязанностей среди участников, а также сроки начала и завершения отдельных этапов работы;

- выполнение пилотного проекта с использованием моделирования работы предприятия, включая ввод фактических данных ограниченного объема в систему и последовательное тестирование бизнес-процессов на реальных ситуациях работы предприятия;

- адаптация ERP-системы с учетом выявленных несоответствий в ходе пилотного проекта: обучение конечных пользователей работе [2];

- опытная эксплуатация: данные вводятся параллельно в старую и новую системы, проводится сверка показателей и отчетов по обеим системам. Постепенно осуществляется ввод в эксплуатацию отдельных участков учета и управления, разрабатываются инструкции по использованию рабочих мест и определяются должностные обязанности [2, 4, 5].

- промышленная эксплуатация: согласно плану ввода внедренной ERP-системы в промышленную эксплуатацию определяются процедуры и работы, составляется план-график перехода;

- поддержка и сопровождение промышленной эксплуатации.

Преимущества ERP-систем для предприятия:

- интеграция бизнес-процессов предприятия: использование одних и тех же данных разными подразделениями [4], сокращение ненужных операций за счет объединения корпоративной информации в единой базе;

- замена множества автономных корпоративных систем и приложений одной ERP-системой;

- сокращение расходов за счет снижения складских запасов предприятия, рост производительности труда, увеличение количества своевременно выполненных заказов, сокращение издержек на административные, непроизводственных расходов [3];



- сокращение числа ошибок персонала за счет унификации производственных процессов, а также процессов учета;
- повышение качества обслуживания заказчиков и взаимоотношений с поставщиками;
- сокращение сроков выхода новых продуктов и услуг благодаря оптимизации бизнес-процессов.

Кроме того, руководство предприятия получает ресурс времени и информации для анализа событий на предприятии и для выработки стратегических решений. Сокращается нагрузка на административный аппарат по подготовке отчетов и аналитической информации, повышается качество планирования работы предприятия.

### Список литературы

1. Айзенберг Г.Е. ERP-система как инструмент управленческого учета // Управленческий учет и финансы. – 2009. – № 3. – С. 220–225.
2. Айзенберг Г.Е. Этапы внедрения ERP-систем // Управленческий учет и финансы. – 2011. – № 4. – С.272–268.
3. Волков Ю.В. Автоматизация бизнеса // Управленческий учет и финансы. – 2014. – № 2. – С.116–120.
4. Катернюк А.В. Реорганизация деятельности предприятий с использованием ERP-систем: основные выгоды, этапы проведения, стоимостной аспект // Управленческий учет и финансы. – 2007. – № 1. – С. 50–64
5. Крюкова А. А. ERP-системы и корпоративные порталы: учебное пособие. – Самара: ПГУТИ, 2019. – 255 с.
6. Смит Д.Б. Выбор ERP: советы профессионала. URL: <http://www.erp-online.ru/analytics/metodology/like.php>
7. Степанов Д.Ю. Проблемы внедрения корпоративных информационных систем: уровень приложений // Менеджмент сегодня. – 2015. – № 3. – С. 180–191.

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ЛОГИСТИКЕ ИМПОРТА КОФЕ В РОССИИ

Кручко А. М., Пилюгина В. А., Фомина И.Г.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная работа посвящена рассмотрению причин резкого роста цен на кофе в 2022 году, одновременно с появлением большого разрыва между спросом и предложением на данный продукт в 2023 году. Для проведения анализа был рассмотрен современный рынок кофе в России, основные страны импортёры и логистические пути доставки данного продукта как в Россию, так и в другие Европейские страны. Были выявлены основные проблемы современного импорта кофе и то, как эти проблемы связаны с изменениями в логистике перевозок.

*Ключевые слова:* рынок кофе, предложение кофе, цены на кофе, робуста, эспрессо, изменения в логистике перевозок, поставки кофе, неурожай, урожай зёрен.

В 2022 году произошёл резкий скачок цен на кофе. Средний чек за покупку кофе в магазинах и онлайн-торговле в августе того года составил 390 рублей — на 44% больше, чем за аналогичный период в 2021 году.

Лидером по поставкам кофе в Россию является Вьетнам с долей 46%, из Бразилии ввозится 20% всего закупаемого кофе. Помимо бразильских и вьетнамских сортов на российских прилавках есть конкуренты из Индонезии, Колумбии, Коста-Рики, Гватемалы, Ямайки, стран Африки.

**Причины роста цен на кофе. Кризис на Красном море:** если в ноябре через Красное море ежедневно перевозили 500 тыс. контейнеров, то в декабре их число сократилось

менее чем до 200 тыс. К привычным двум месяцам пути до Москвы теперь добавляется ещё три-четыре недели.

**Неурожай из-за засухи:** в 2022 году в Бразилии была собрана только половина урожая зёрен арабики. Ситуация не стала лучше и в 2023 году, поскольку арабика даёт большой урожай в чётные годы, и сборы кофе в Бразилии соответственно привязаны к двухгодичным циклам. Помимо Бразилии от непогоды пострадали и плантации в Колумбии. В Индонезии, которая занимает третье место в мире по производству робусты, также ожидается самый низкий урожай за десять лет.

**Методы решения проблем. Усиление импорта из Бразилии:** это возможно за счёт улучшения климатической ситуации и того, что некоторые плантации производства были расширены и перемещены в другие регионы, что позволяет вернуть производительность на более высокий уровень. Новые ежемесячные показатели Sesaфё за январь 2024 года, свидетельствуют о значительном увеличении поставок зелёного кофе из Бразилии.

**Выработка сорта «Либерика»:** учёные из Великобритании и Уганды прогнозировали, что сорт кофе «либерика» может стать основным в мире, потеснив привычные арабику и робусту. Либерика происходит из Либерии в Западной Африке, однако сегодня по большей части она выращивается и потребляется в Юго-Восточной Азии, а именно на Филиппинах (более 70% всего выращиваемого кофе).

### Список литературы

1. Российский рынок кофе. Тренды рынка кофе // Журнал - Российский продовольственный рынок. 2024. № 1. URL: <https://foodmarket.spb.ru/archive/2024/222980/222983/> (дата обращения 15.02.2024).
2. Российский рынок чая и кофе в 2022 году в контексте мировых тенденций // АБ-Центр - Экспертно-аналитический центр агробизнеса. 2022. URL: <https://ab-centre.ru/news/rossiyskiy-rynok-chaya-i-kofe-v-2022-godu-v-kontekste-mirovyh-tendenciy> (дата обращения 15.02.2024).
3. Synchronous climate hazards pose an increasing challenge to global coffee production // PLOS Climate. 2023. URL: <https://journals.plos.org/climate/article?id=10.1371/journal.pclm.0000134> (дата обращения 17.02.2024).
4. Производство кофе в Бразилии в 2024/25 году вырастет на 5,5% // CoffeeTea.RU. 2024. URL: <https://coffeetea.ru/2024/01/23/39056/> (дата обращения 17.02.2024)
5. Посол заявил о планах Бразилии увеличить поставки кофе в Россию // РБК. 2023. URL: [https://www.rbc.ru/rbcfreenews/64f93b1e9a794730d0d8b49b?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=desktop&utm\\_referre=https%3A%2F%2Fdzen.ru%2Fnews%2Fsearch%3Ftext%3D](https://www.rbc.ru/rbcfreenews/64f93b1e9a794730d0d8b49b?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop&utm_referre=https%3A%2F%2Fdzen.ru%2Fnews%2Fsearch%3Ftext%3D) (дата обращения 19.02.2024)

## ВЫБОР ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ

А.И. Прудникова И.А. БРУСАКОВА

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** В современном динамическом мире эффективное управление складом является ключом к успеху любого бизнеса. Цифровые платформы для складской логистики предлагают широкий спектр возможностей для автоматизации процессов, оптимизации работы склада и снижения расходов. В этой статье рассматриваются ключевые факторы, которые необходимо учитывать при выборе цифровой платформы для склада. Описываются функциональные возможности платформ, их интеграцию с другими системами, масштабируемость, стоимость, уровень безопасности и уровень поддержки клиентов. Также даются рекомендации по проведению тестирования платформ и выбору оптимального решения для бизнеса. Эта статья будет полезна руководителям складов, логистам, специалистам по цепочке поставок и всем тем, кто хочет улучшить эффективность работы своего склада с помощью цифровых технологий.

*Ключевые слова:* цифровая платформа, складская логистика, управление складом, эффективность, интеграция, автоматизация, оптимизация.

Выбор цифровой платформы для управления складской логистикой может значительно повысить эффективность работы склада, снизить расходы и улучшить обслуживание клиентов.

На примере компании ООО «ЗАСТАВСКАЯ» был проведен анализ модели бизнес-процесса «как есть» выбор цифровой платформы.

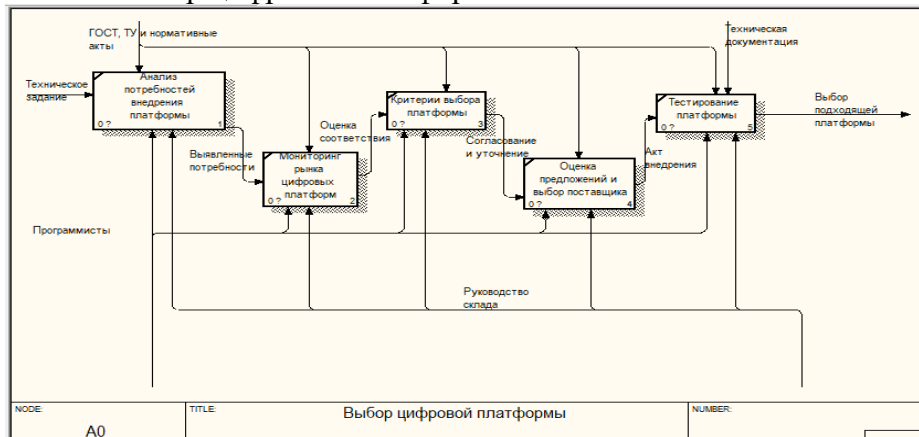


Рис. 1 – Модель бизнес-процесса «как есть»

При анализе бизнес-процесса на предприятие ООО «ЗАСТАВСКАЯ» были выявлены проблемные процессы. Во-первых, отсутствие ясного определения потребностей при выборе платформы. Во-вторых, недостаток экспертов, знающих специфику цифровых платформ и их интеграцию с логистическими процессами, приводит к ошибкам при выборе. В-третьих, не проведенная оценка эффективности выбранной платформы перед полным внедрением приводит к неожиданным проблемам в работе и отсутствию ожидаемого результата логистических процессов.

Однако при выборе такой платформы важно учитывать множество факторов, чтобы сделать правильный выбор.

Существуют некоторые ключевые моменты, которые необходимо учитывать при выборе платформы:

1. Функциональность:

Какие функции необходимы для управления складом?

Может ли платформа обеспечить эти функции?

Есть ли у платформы возможности для масштабирования и расширения функциональности в будущем?

2. Интеграция:

Может ли платформа интегрироваться с существующими системами управления бизнесом, системами управления запасами и другими системами?

Насколько проста интеграция?

3. Масштабируемость:

Может ли платформа масштабироваться по мере роста бизнеса?

Будет ли возможность добавлять новых пользователей, склады и функции по мере необходимости?

4. Стоимость:

Сколько стоит платформа?

Какие существуют модели лицензирования?

Есть ли скрытые платежи или расходы?

5. простота использования:

Насколько прост и интуитивно понятен интерфейс платформы?

Могут ли сотрудники быстро освоить работу с платформой?

Предлагает ли поставщик платформы обучение и поддержку?

6. Безопасность:

Как защищена информация на платформе?

Соответствует ли платформа отраслевым стандартам безопасности?

Какие меры предпринимаются для восстановления данных в случае сбоя?

7. Поддержка клиентов:

Какую поддержку предлагает поставщик?

Как легко дозвониться до службы поддержки?

Предлагает ли поставщик документацию и обучающие материалы?

Определение критериев выбора:

– Функциональность платформы:

Управление складом, управление запасами.

– Масштабируемость платформы:

Возможность расширения для малого бизнеса.

– Стоимость платформы:

до 1 000 000 рублей.

– Интеграция:

Система ERP.

– Уровень поддержки клиентов (доступность технической поддержки, обучающие материалы).

– Безопасность платформы (защита данных, резервное копирование).

Таблица 1

Матрица сравнений платформ по критериям

<i>Платформа</i>	<i>СберЛогистика</i>	<i>SAP SCM</i>	<i>Manhattan Active</i>	<i>SwiftLog</i>
<i>Функциональность</i>	<i>Управление запасами, управление складом</i>	<i>Управление запасами, управление складом</i>	<i>Управление запасами, управление складом</i>	<i>Управление запасами, управление складом</i>
<i>Масштабируемость</i>	<i>Для всех размеров бизнеса</i>	<i>Для всех размеров бизнеса</i>	<i>Для всех размеров бизнеса</i>	<i>Для всех размеров бизнеса</i>
<i>Стоимость</i>	<i>Внедрение (включая стоимость лицензии): от 200 000 руб.</i>	<i>Внедрение (включая стоимость лицензии): от 10 млн.руб.</i>	<i>Внедрение (включая стоимость лицензии): от 5 млн. руб.</i>	<i>Внедрение (включая стоимость лицензии): от 3 млн.руб.</i>
<i>Интеграция</i>	<i>ERP</i>	<i>ERP</i>	<i>ERP</i>	<i>ERP</i>
<i>Уровень тех. поддержки</i>	<i>Есть с обучением, стоимость включена во внедрение</i>	<i>Есть с обучением, стоимость включена во внедрение</i>	<i>Есть с обучением, стоимость включена во внедрение</i>	<i>Есть с обучением, стоимость включена во внедрение</i>
<i>Безопасность данных</i>	<i>Есть. ISO 27001 и SOC 2</i>	<i>Есть. Правила конф-ти: GDPR, CCPA</i>	<i>Есть. Правила конф-ти: GDPR, CCPA</i>	<i>Есть. Правила конф-ти: GDPR, CCPA</i>

Таблица 2

Экспертные оценки

Платформа	СберЛогистика	SAP SCM	Manhattan Active	SwiftLog
Функциональность	0,9	0,8	0,7	0,8
Масштабируемость	0,7	0,6	0,8	0,5
Стоимость	0,9	0,8	0,7	0,6
Уровень тех. поддержки	0,7	0,8	0,7	0,9
Безопасность данных	0,8	0,9	0,8	0,8

Итоговое предпочтение СберЛогистики = 0,9 + 0,7 + 0,9 + 0,7 + 0,8 = 4,0

Итоговое предпочтение SAP SCM = 0,8 + 0,6 + 0,8 + 0,8 + 0,9 = 3,9

Итоговое предпочтение Manhattan Active = 0,7 + 0,8 + 0,7 + 0,7 + 0,8 = 3,7

Итоговое предпочтение SwiftLog = 0,8 + 0,5 + 0,6 + 0,9 + 0,8 = 3,6

Платформа СберЛогистика является наиболее предпочтительным с суммой предпочтений 4.

При использовании цифровой платформы на складах ООО «ЗАСТАВСКАЯ» большой объем работы перейдет с сотрудников склада на платформу.

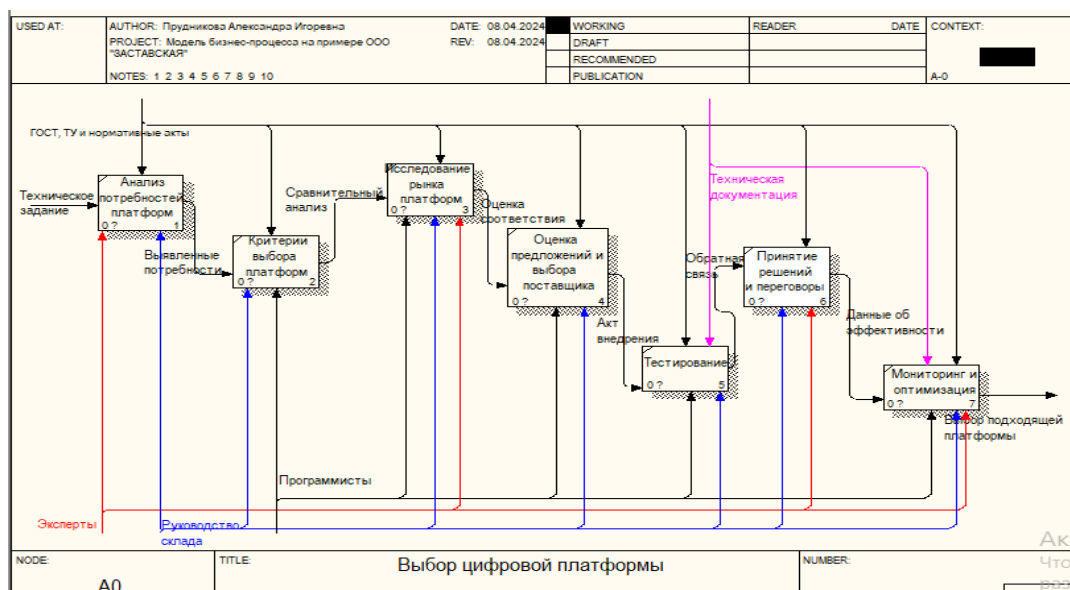


Рис. 2 – Модель бизнес-процесса «как надо»

Для усовершенствования бизнес-процесса выбора цифровой платформа были предложены следующие мероприятия:

1. Четко формулировать цели и требования к цифровой платформе;
2. Составлять список платформ, которые соответствуют критериям выбора платформы;
3. Проводить детальную оценку каждой выбранной платформы;
4. Регулярно оценивать эффективность выбранной платформы;
5. Привлечь квалифицированных экспертов для оценки платформы.

Выбор цифровой платформы для складской логистики – важное решение, которое может значительно повысить эффективность работы склада.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

Следуя, этим советам можно сделать правильный выбор платформы, которая будет соответствовать потребностям бизнеса и поможет достичь поставленных целей.

### Список литературы

1. Дыбская, В. В. Логистика складирования: учебник / В. В. Дыбская. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 559 с.
2. Новиков, В. Э. Информационное обеспечение логистической деятельности торговых компаний: учебное пособие для вузов / В. Э. Новиков. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 184 с.
3. Сергеев, В. И. Логистика снабжения : учебник для вузов / В. И. Сергеев, И. П. Эльяшевич ; под общей редакцией В. И. Сергеева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2022. – 440 с.
4. <https://rosinvest.com/page/optimizacija-skladskoj-logistiki-kak-osnova-effektivnoj-raboty-predpriyatija> (дата обращения 25.04.2024)
5. <https://www.tks.ru/logistics/2013/12/05/0002> (дата обращения 12.04.2024)
6. <https://itelon.ru/blog/kak-izmenitsya-skladskaya-infrastruktura-logistika-i-distributsiya-k-2025-godu/> (дата обращения 13.04.2024)

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА

РОГАЧЁВ Н.А.

*ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)»*

**Аннотация.** В статье приводится обзор технологий искусственного интеллекта и основных задач, которые он может решать в сфере электронного документооборота в больших компаниях: классификация и сортировка входящих документов, извлечение данных из документов, интеллектуальный точный поиск документов, подбор и использование шаблонов для автоответов на письма, проверка различных ключевых атрибутов документов, выполнение текстовых и голосовых команд, распознавание отсканированных документов и их перевод в цифровой вид. Системы электронного документооборота с искусственным интеллектом постепенно завоевывают свои позиции, помогая бизнесу анализировать и обрабатывать большое количество информации. При этом искусственный интеллект не заменяет специалистов, а дополняет их и становится инструментом для работы с данными, который помогает принимать решения, освобождает от рутинных операций и минимизирует ошибки.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, машинное обучение, документооборот

Развитие технологий и методов искусственного интеллекта может существенно изменить привычную работу пользователей в информационных системах. В части электронного документооборота искусственный интеллект должен взять на себя большинство рутинных операций пользователей, оптимизировать и ускорить их в несколько раз.

Искусственный интеллект — это способность компьютера обучаться, принимать решения и выполнять действия, свойственные человеческому интеллекту [1]. Технологии искусственного интеллекта способны обрабатывать огромные объемы данных, находить в них закономерности, прогнозировать, делать выводы и принимать решения аналогично тому, как это делает человек в реальности [2].

Осенью 2023 года президент Российской Федерации В.В. Путин на конференции «Путешествие в мир искусственного интеллекта» отметил, что: «для гражданина повседневное внедрение передового поколения искусственного интеллекта – это современная человекоцентричная социальная сфера, это новое качество жизни и новые возможности для профессиональной деятельности. По сути, человек может делегировать машине многие рутинные функции в быту, на производстве, в управлении и даже в сфере креативных индустрий. И, напротив, взять на себя самые сложные задачи» [3].

Электронный документооборот является той сферой деятельности предприятий, в которой искусственный интеллект может дать ощутимый и реальный эффект. Есть много ситуаций, в которых искусственный интеллект может повысить эффективность работы с документами компании. Если обобщить все задачи, в которых чаще всего применяется искусственный интеллект в делопроизводстве, то можно выделить следующие области применения [4].

**Классификация и распределение.** Классификация входящего потока документов и писем, а также их распределение конкретным подразделениям и работникам внутри компании. Это особенно актуально для больших компаний, в которых за год может обрабатываться более 100 тыс. первичных документов (акты, счета, товарные накладные и т.д.). Как правило, входящие документы и письма от контрагентов поступают в единый личный кабинет компании, поэтому задача искусственного интеллекта – первичная обработка, классификация и распределение поступающих документов, разработка алгоритмов, которые позволяют автоматически разбирать тип и тему входящих писем, содержимое файлов, а затем распределять их между подразделениями внутри компании.

**Извлечение данных.** При поступлении входящих документов их можно разобрать по ключевым реквизитам (например, номер документа, дата, наименование контрагента, сумма и др.) и автоматически создать карточки документов во внутренней корпоративной информационной системе или системе ЭДО. Это может существенно ускорить процесс создания и согласования документов внутри компании, а также снизить ошибки при вводе документов в систему, минимизируя риск ошибки из-за человеческого фактора.

**Поиск документов.** Различные оценки показывают, что до 30% рабочего времени офисных сотрудников уходит на поиск документов. Часто простого ввода одного слова в поисковую строку недостаточно, так как результаты могут быть неточными или отсутствовать из-за различных формулировок, ошибок, использования синонимов и других факторов [5]. Использование интеллектуального поиска позволяет игнорировать неточности в запросах и ускоряет процесс поиска нужных документов по ключевым словам в различных грамматических формах, синонимам и связанным понятиям.

**Шаблоны ответов.** Используя искусственный интеллект, можно создать список из стандартных ответов на входящие письма или автоматически отправлять автоответы в определенных ситуациях. Система электронного документооборота может предложить необходимые фразы и предупредить об ошибках. Также есть возможность автоматически устанавливать стандартные резолюции (например, «в работу», «для ознакомления» и др.) на аналогичных документах, назначать исполнителей, оставляя руководителю только проверку шаблона и нестандартных ситуаций.

**Проверка документов.** Искусственный интеллект способен проверять набор атрибутов документов, например срок действия договоров, суммы и формировать задачи для дальнейших действий. Кроме того, с помощью технологий можно автоматически проверять контрагентов в федеральных реестрах, проверять наличие доверенности

контрагента, проверять правильность данных в договорах на соответствие информации о сделке в учетной системе и нормативным актам компании, а также создавать проекты виз для согласования (с указанием ошибок или необходимых правок).

Выполнение команд. Сейчас набирают популярность цифровые помощники — они используются в банковских чат-ботах и других решениях. В электронном документообороте такие ассистенты могут пригодиться для выполнения команд, например «покажи мне все документы и письма, которые необходимо согласовать до конца дня», «выведи список документов, которые подлежат уничтожению до конца месяца» или «разошли напоминание по электронной почте всем исполнителям, кто еще не выполнил поручения по документу» и другие подобные.

Распознавание. Используя технологии OCR, система автоматически распознает тексты в отсканированных бумажных документах, что дает возможность перевести их в удобный цифровой вид и далее работать как с любым электронным документом. В этом случае экономится время сотрудников и снижает количество ошибок на этапе обработки данных. По распознанному документу также упрощается интеллектуальный поиск.

Интеллектуальные технологии нужны, прежде всего, чтобы взять на себя всю рутинную работу с документами, которая в крупных компаниях может отнимать очень большую часть рабочего времени. Особенно заметен эффект от использования в крупных организациях, ежедневно обрабатывающих большие объемы бумаг, либо владеющих объемным электронным архивом. Использование искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет снизить количество ошибок, в разы сократить время на обработку документов и, в конечном счете, выполнять больше важных бизнес-задач. При этом компании получают многофункциональное решение, позволяющее уменьшить нагрузку на сотрудников, избавив их от рутины, и повысить эффективность бизнеса в целом.

В настоящий момент в Российской Федерации пока нельзя сказать, что внедрение систем ЭДО с интеллектуальными технологиями носит массовый характер, но тем не менее, вендорам и интеграторам уже поступают такие запросы от заказчиков, проводятся тематические конференции. Системы ЭДО с искусственным интеллектом постепенно завоевывают свои позиции, помогая бизнесу анализировать и обрабатывать большое количество информации. При этом важно отметить, что искусственный интеллект не заменяет специалистов, а дополняет их. Он становится инструментом для работы с данными, помогает принимать решения, освобождает от рутины и минимизирует ошибки. В итоге в выигрыше остаются все — и бизнес, и сотрудники.

### Список литературы

1. Искусственный интеллект, машинное обучение и глубокое обучение: в чём разница // Сайт Skillbox. 8 декабря 2020 г. – URL: [https://skillbox.ru/media/code/iskusstvennyy\\_intellekt\\_mashinnoe\\_obuchenie\\_i\\_glubokoe\\_obuchenie\\_v\\_chyem\\_raznitsa/](https://skillbox.ru/media/code/iskusstvennyy_intellekt_mashinnoe_obuchenie_i_glubokoe_obuchenie_v_chyem_raznitsa/).
2. Второй разум: как развивается искусственный интеллект и что его ждёт в будущем // Сайт Яндекс.Практикум. 28 июня 2023 г. – URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-iskusstvennyi-intellekt/>.
3. Президент принял участие в пленарном заседании Международной конференции по искусственному интеллекту и машинному обучению Artificial Intelligence Journey 2023 на тему «Революция генеративного ИИ: новые возможности» // Сайт Президента РФ. 24 ноября 2023 г. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/72811>.



ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

4. Документооборот по-умному: как искусственный интеллект находит применение в ЭДО // Сайт Vc.ru. 30 октября 2023 г. – URL: <https://vc.ru/office/896702-dokumentooborot-po-umnomu-kak-iskusstvennyu-intellekt-nahodit-primeneniye-v-edo>.

5. AI-делопроизводитель: как нейросети меняют документооборот // Сайт Деловой мир. 31 августа 2023 г. – URL: <https://delovoyimir.biz/ai-deloproizvoditel-kak-neyroseti-menyayut-dokumentooborot.html>.

## РЫНОК РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА СКВОЗНЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И.М. РОМАНЧАК, М.И. ЖИТЕНЕВА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
имени В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию рынков решений России и мира в области сквозных цифровых технологий, а именно в сфере искусственного интеллекта. В настоящее время происходит быстрое развитие новых технологий, которые повсеместно входят в нашу жизнь, поэтому исследования и проекты в этой области очень актуальны и важны. Используя такие исследовательские методы, как сравнение и моделирование, автор оценивает эффективность мер, применяемых в России для достижения результатов в области сквозных цифровых технологий.

*Ключевые слова:* сквозные цифровые технологии, искусственный интеллект

Правительство Российской Федерации 28 июля 2017 года утвердило программу «Цифровая экономика Российской Федерации». Её целями являются создание экосистемы цифровой экономики Российской Федерации, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности.

Правительство Российской Федерации совместно с Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ создали национальный проект «Цифровая экономика Российской Федерации» на период с 2019 по 2024 годы. Целью проекта является обеспечение технологической независимости государства, возможности коммерциализации отечественных исследований и разработок, а также ускорение технологического развития российских компаний и обеспечение конкурентоспособности разрабатываемых ими продуктов и решений на рынке [1]. В рамках программы «Цифровая экономика РФ» входят основные сквозные цифровые технологии.

Одно из направлений сквозных цифровых технологий: «Искусственный интеллект и нейротехнологии»; возникает вопрос: развивается ли эта отрасль или она уже не актуальна? Рассмотрим в цифрах развитие Искусственного интеллекта (AI– artificial intelligence) -- индустрии в мире: если еще в 2015 году всего 2% – \$4,6 млрд от венчурных инвестиций приходилось на компании по разработке ИИ, за 2022 год было уже 8% — \$36 млрд от общего мирового объема. За первые пять месяцев 2023 года — \$20,4 млрд, или 17% от всех VC инвестиций забрали стартапы, есть все предпосылки, что по итогам года общая сумма инвестиций будет выше, чем в 2022 году. В России к 2020 году российский рынок вырос более чем в 2 раза по сравнению с 2019 — достиг 291 млн долларов США. Сегодня это 0,5% от мирового рынка — его объём оценивается в 58,3 млрд долларов. Россия отстает от мира в данном направлении [2].

В рамках разработки дорожной карты развития СЦТ «Искусственный интеллект и нейротехнологии» были выделены семь субтехнологий СЦТ (суб-СЦТ), табл. 2. В

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

дорожной карте развития «Искусственного интеллекта и нейротехнологии» определены важные этапы и задачи для достижения максимальных результатов, возможность использование искусственного интеллекта в различных областях, таких как автоматическое управление, робототехника, финансы и маркетинг.

Размер решений в сфере ИИ и нейротехнологий мирового рынка и России представлены в табл. 1 и 2 [4].

Таблица 1

**Размер мирового рынка решений в сфере ИИ и нейротехнологий в разрезе суб-СЦТ, млрд \$ США**

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Рынок решений в сфере ИИ	21,5	29,2	39,8	54,3	73,9	100,7	137,2
Суб-СЦТ «Компьютерное зрение»	3,5	5,2	7,7	11,5	17,1	25,3	37,6
Суб-СЦТ «Обработка естественного языка»	10,3	11,9	13,8	16,1	19,3	24,1	30,2
Суб-СЦТ «Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений»	6,6	10,8	16,7	24,9	35,4	48,6	65,9
Суб-СЦТ «Распознавание и синтез речи»	1,1	1,3	1,5	1,8	2,2	2,7	3,5
Рынок решений в сфере нейротехнологий	1,3	1,7	2,3	3,0	4,0	5,3	7,0
Суб-СЦТ «Нейростимуляция и нейросенсинг»	0,3	0,4	0,6	0,8	1,1	1,6	2,3
Суб-СЦТ «Нейропротезирование и нейроинтерфейсы»	1,0	1,3	1,7	2,2	2,8	3,7	4,7

Таблица 2

**Размер российского рынка решений в сфере ИИ в разрезе суб-СЦТ, млрд рублей**

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Рынок решений в сфере ИИ	2,1	6	16,9	48	71,7	107,2	160,1
Суб-СЦТ «Компьютерное зрение»	1	2,7	7,5	20,4	29,3	42,1	60,5
Суб-СЦТ «Обработка естественного языка»	0,4	1	3	8,7	13,1	19,8	29,9
Суб-СЦТ «Рекомендательные системы и интеллектуальные	0,2	0,8	2,5	8	13,3	21,6	34,8

системы поддержки принятия решений"							
Суб-СЦТ «Распознавание и синтез речи»	0,5	1,4	3,9	10,9	16,1	23,7	34,9
Рынок решений в сфере нейротехнологий	0,1	0,4	1	2,6	3,8	5,6	8,2
Суб-СЦТ «Нейростимуляция и нейросенсинг»	0,03	0,1	0,2	0,7	1,1	1,7	2,6
Суб-СЦТ «Нейропротезирование и нейроинтерфейсы»	0,1	0,3	0,7	1,9	2,8	3,9	5,5

Согласно данным в табл.1 и 2 в развитие сквозной цифровой технологии ИИ вкладываются миллиарды валютных ресурсов, что подтверждает значимость и необходимость развития направления ИИ.

На основании данных табл. 1 и 2 и данных о среднегодовом курсе доллара по отношению к рублю (за 2018-2022 год) [5] а также прогноза Минэкономразвития среднегодового курса за 2023 и 2024 года [6] и сумме за каждый год по всем Суб-СЦТ автором проведены расчёты и построен график зависимости размера решений в сфере ИИ в мире и России.

Зависимость размера решений в сфере ИИ в мире и России представлена на графике (Рис. 1. График размера решений в сфере ИИ в мире и России).



Рис. 1. График размера решений в сфере ИИ в мире и России

Согласно графику, Россия значительно отстаёт в рамках развития решений в сфере ИИ, и пока не удается составить конкуренцию миру в этой сфере.

Развитие нейротехнологий и искусственного интеллекта продолжает расширяться, предоставляя удивительные возможности и создавая новые вызовы. Образование и информирование общества играют важную роль в развитии нейротехнологий и искусственного интеллекта. Цифровизация населения, увеличение компаний, работающих в сфере нейротехнологий и ИИ, а также сотрудничество с крупными предприятиями в

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

мире, в данной политической ситуации такими партнёрами могут стать китайские компании, которые в данное время составляют конкуренцию на рынке решений США.

### Список литературы

1. Сайт Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, раздел «Цифровая экономика РФ» [Электронный ресурс] URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/878/>
2. [Электронный ресурс] URL: [https://forbes.kz/economy/investment/vo\\_chno\\_investirovat\\_na\\_ryinke\\_iskusstvennogo\\_intellekta\\_v\\_2023\\_godu](https://forbes.kz/economy/investment/vo_chno_investirovat_na_ryinke_iskusstvennogo_intellekta_v_2023_godu)
3. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»;
4. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Нейротехнологии и искусственный интеллект» от 10 октября 2019 года [Электронный ресурс] URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/07102019ii.pdf>
5. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kursvaliut.ru/средний-курс-валют-за-месяц-2023>
6. [Электронный ресурс] URL: <https://rg.ru/2023/09/12/minekonomrazvitiia-sprognozirovalo-srednegodovoj-kurs-dollar-a-v-2024-godu.html>

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ФИНАНСИРОВАНИЯ ДЛЯ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА В СФЕРЕ ИСТ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ООО КЗ «СПУТНИК»

М.Д. СМОЛИНА

*«Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»*

**Аннотация.** В данной статье апробирован алгоритм выбора оптимального метода финансирования для инновационного проекта в сфере ИСТ на примере проекта “GeoMapping” ООО КЗ “Спутник”. Значимость данного алгоритма подкреплена современными трендами управления, которые подразумевают адаптацию к условиям быстрых изменений, включение социальных факторов в финансовую стратегию, а также существование высокой конкуренции в связи с развитой аналитикой данных. Методологической базой работы являются сравнительный анализ методов финансирования инновационных проектов, ряд проведенных полужформализованных интервью с менеджерами компании, анализ официальной документации проекта и компании. В результате работы был разработан алгоритм выбора оптимального метода финансирования для инновационного проекта, проведена его апробация и доказана применимость.

*Ключевые слова:* финансирование проектов, методы финансирования, алгоритм выбора метода финансирования, проектное управление, гибкие методологии.

Современные тренды управления оказывают значительное влияние на процесс финансирования проектов, так как менеджерам проекта необходимо учитывать несколько важных аспектов при выборе метода финансирования: специфику гибких методологий, наличие социальной ответственности за проект и влияние устойчивого развития.

Гибкие методологии, такие как Agile и Scrum, подразумевают адаптацию к быстрым изменениям рынка, чем создают потребность адаптировать стратегию финансирования в соответствии с изменениями рынка. Развитие аналитики данных предоставляет компаниям новые инструменты для более глубокого и точного анализа финансовых рисков и возможностей. Использование аналитики данных для оценки

потенциала проектов улучшает принятие решений и способствует выбору наиболее подходящих и эффективных методов финансирования.

Целью данного исследования является разработка и апробация алгоритма оптимизации процесса выбора метода финансирования инновационных ИСТ проектов, адаптированного к динамичной рыночной среде.

При реализации данного исследования были проанализированы теоретические основы методов финансирования инновационного проекта; проведен сравнительный анализ основных методов и источников финансирования проектов, разработан и апробирован алгоритм выбора оптимального метода финансирования для инновационного проекта на примере одного из проектов, реализуемых в ООО КЗ “Спутник”.

Теоретической и методологической базой исследования являются научные труды отечественных и зарубежных ученых в сфере управления проектами в организации, менеджмента, стратегического управления, таких как М. Л. Разу, А. В. Алешин, А. А. Дульзон.

**Разработка алгоритма.** С целью создания алгоритма выбора оптимального метода финансирования для инновационного проекта была разработана сравнительная таблица доступных в РФ методов финансирования проекта. На основании проанализированных характеристик были отобраны критерии сравнения, которые позволяют сформировать целостное представление об особенностях каждого метода поиска инвестиций, чертах их сходства и различия. (Табл.1).

Таблица 1

**Сравнительная таблица методов финансирования инновационного проекта**

	Акционирование	Инвестиционный кредит	Облигационный займ	Венчурное финансирование	Проектное финансирование	Государственное	Лизинг
<i>Форма инвестиций</i>	денежные	денежные	денежные	денежные + мнение инвестора	денежные, возможен лизинг	денежные	имущество
<i>Характеристика проекта</i>	чаще крупный	- быстрореализуемый - высокоэффективный	привилегии при большом объеме	новая продукция или технология	перспективный	- окупаемость < 2 лет - сфера - “точки роста” РФ	инвестиции в виде имущества
<i>Наличие залоговых обязательств</i>	нет	- да - средние компании не смогут привлечь крупный	- да - нет, при выпуске без обеспечения	нет	да	да	нет
<i>Стоимость заемных средств</i>	0.2% ном. суммы выпуска (<100.000 руб.)	относительно высокая	меньше ставки инвестиционного кредита	процентной ставки нет	высокая в связи с риском для инвестора	низкий процент или безвозмездно	выше инвестиционного кредита
<i>Проектная стадия</i>	стабильный бизнес	стабильный бизнес	стабильный бизнес	начальная	любая	любая	любая
<i>Размер</i>	Зависит от	Зависит от	>	любой	любой	любой	возможность

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16-18 мая 2024

<i>инвестиций</i>	масштаба компании	масштаба компании	50.000.000 руб				ь покрытия капитальных затрат
<i>Раскрытие данных</i>	да	нет	да	Да	нет	да	нет
<i>Финансовое состояние</i>	устойчивое	устойчивое	устойчивое	нет требований	нет требований	устойчивое	устойчивое
<i>Необходимость первичных вложений</i>	-создание АО (40-300 тыс. руб.) -затраты на эмиссию и размещение акций	сбор документов и проработка бизнес-плана	затраты на эмиссию и размещение облигаций	проработка бизнес-плана, создание прототипа	сбор документации и проработка бизнес-плана	нет	нет
<i>Временные затраты на привлечение</i>	- регистрация АО -затраты на эмиссию и размещение	небольшие (около 2-х месяцев)	небольшие (около 4-х месяцев)	около 6-ти месяцев	анализ инвестором бизнес-плана	затраты на бюрократическую работу	почти нет
<i>Экономия на налогах</i>	нет	эффект фин. рычага	нет	Нет	эффект фин. рычага	нет	уменьшение налогооблагаемой базы
<i>Срок погашения</i>	дивиденды раз в год, но возможны вариации	в основном, от 3 до 5 лет	> 1 года (обычно 3 - 5)	не погашается	в основном, от 3 до 10 лет	- < 2 лет - исключения при масштабных проектах	1-3 года
<i>Участие инвестора</i>	-обычные акции - влияние большинства голосов - привилегированные - не имеют права голоса	банк может запросить проверку, но не принимает участие в управлении	раздробленность держателей облигаций минимизирует силу влияния	участие в управлении	-влияние кредитора на деятельность проекта -контроль кредитора	контроль расходований бюджетных средств со стороны государства	нет
<i>Следствие возможной неплатежеспособности и получателя инвестиций</i>	дивиденды по займу могут вообще не выплачиваться акционерам	условия кредита могут быть оптимизированы, иначе, изъятие имущества по залоговым обязательствам	выплата займа обязательна даже при банкротстве	риски на инвесторе	-условия могут быть оптимизированы, иначе, изъятие имущества по залоговым обязательствам	условия могут быть оптимизированы, иначе, изъятие имущества по залоговым обязательствам	изъятие инвестиционного ресурса

Детальный бизнес-план	да	да	да	основание к вложению средств	основание к вложению средств	да	нет
-----------------------	----	----	----	------------------------------	------------------------------	----	-----

Далее был разработан алгоритм, на основании которого осуществлялся процесс выбора оптимального метода финансирования для анализируемого проекта в зависимости от его специфики.

Алгоритм поиска источника финансирования будет основан на иерархическом расположении основных критериев сравнения, включенных в сравнительную таблицу. В зависимости от соответствия проекта той или иной характеристике, для каждого проекта прогон по алгоритму будет иметь индивидуальную траекторию. При условии того, что в результате прогона по алгоритму будет существовать выбор между несколькими доступными источниками финансирования, владельцу проекта необходимо будет осуществлять его в зависимости от того, какие преимущества он считает приоритетными.

В результате уменьшения количества доступных для проекта способов привлечения инвестиций, выбор оптимального из них упрощается, что является преимуществом для владельца проекта в связи с экономией временных издержек, требуемых на реализацию данного процесса.

**Апробация.** ООО "КЗ "Спутник" - камнеобрабатывающий завод, зарегистрированный на территории Российской Федерации с 2012 года. Основываясь на отчете о финансовой деятельности предприятия, можно сделать вывод, что доходы завода, а также чистая прибыль после налогообложения растут по сравнению с предыдущим годом. Это объясняет установление долгосрочной цели по масштабированию и развитию завода, в частности, запуске новых инновационных проектов.

На подготовительном этапе апробации разработанного алгоритма необходимо осуществить анализ выбранного проекта ООО КЗ "Спутник". На основании отчетов, а также интервью с финансовым директором компании Зониным Дмитрием Сергеевичем было выявлено, что одним из самых актуальных на сегодняшний день проектов является проект под названием "GeoStone Mapping" (инновационный проект, направленный на разработку автоматизированной системы для точного определения площади объектов строительства и ландшафтного дизайна с помощью изображений, полученных от дронов и спутников).

При апробации разработанного алгоритма следует пошагово определять соответствие проекта той или иной характеристике, требуемой для продолжения выполнения алгоритма (Табл.2).

Таблица 2

**Апробация алгоритма на проекте "GeoStone Mapping"**

Шаг алгоритма	"Ответ" проекта	Пояснение ответа
Лизинг как допустимая форма инвестиций	нет	Специфика проекта не предусматривает возможность лизинга, так как основные вложения должны быть направлены на разработку и апробацию системы, не существующей на сегодняшний день. Кроме того, невозможность лизинга является следствием необходимости привлечения инвестиционных ресурсов на установку и иные технические работы, что не может быть полностью покрыто за счет лизингового финансирования.

Устойчивое финансовое состояние компании	да	Финансовые показатели компании демонстрируют устойчивый рост из года в год. Это указывает на активное развитие компании и укрепление её позиций на рынке камнеобработки. Таким образом, финансовое состояние компании можно считать стабильным.
Готовность раскрыть информацию о в публичных источниках	да	“Спутник” является открытым обществом с ограниченной ответственностью данные о финансовой деятельности компаний предоставляются в виде отчетов на постоянной основе в открытом доступе в соответствии с законодательством РФ.
Соответствие проекта “точкам роста” экономики РФ	нет	Проект может способствовать достижению ряда стратегических целей в рамках развития экономики и промышленности, но для того чтобы быть признанным частью "точек роста", необходимо его явное включение в соответствующие государственные программы и инициативы. На данный момент компания не ставит цель получить государственное финансирование, так как проект разрабатывается с большей направленностью на развитие компании, а не развитие и рост на государственном уровне.
Сумма требуемых инвестиций >50 млн. руб?	нет	Данные, полученные на основании информации из официальных документов и полуформализованного интервью, для реализации проекта требуется 24 млн. руб, что не превышает границу в 50 млн. руб., являющейся пороговой для возможности привлечения инвестиций за счет облигационного займа.
Допустимость смены организационной формы на АО и осуществления эмиссии ценных бумаг	нет	Основываясь на официальной информации и проведенных интервью, компания не планирует смену юридической формы на основании не разглашаемой информации.

В результате алгоритма, выявлено, что оптимальными методами финансирования для проекта "GeoStone Mapping" являются инвестиционный кредит или проектное финансирование. Алгоритм продемонстрировал свою эффективность и применимость для определения подходящего метода финансирования, что создает основу для дальнейшего развития финансовых стратегий в компании "Спутник". Таким образом, практическая значимость работы заключается в создании алгоритма, позволяющего владельцу проекта сократить издержки при поиске и выборе оптимального метода привлечения финансовых ресурсов для инновационного проекта в сфере ICT.

### Список литературы

- 1.Алешин А.В. Управление проектами: фундаментальный курс: учеб. пособие / А.В. Алешин, В.М. Аньшин, К.А. Багратиони; под ред. В.М. Аньшина, О.Н. Ильиной; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2013. — 620 с.
- 2.Баркова Е. Е. Разработка алгоритма выбора источника финансирования инновационных проектов на ранних стадиях жизненного цикла //Вестник Российского университета кооперации. – 2020. – №. 1 (39). – С. 11-18.
- 3.Башарина О. В., Бубин М. Н. Классификация источников финансирования в рамках программ государственной поддержки //Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2019. – №. 1. – С. 74-79.
4. Бобров Д. А. Источники финансирования деятельности проектной компании //Развитие российского общества: вызовы современности. – 2021. – С. 392-396.



5. Гурджиев Я. Р., Коган М. В. Вопросы выбора источников финансирования проектов в современных условиях // *Инновационные аспекты развития региона: практика, проблемы, перспективы.* – 2021. – С. 73-76.
6. Деменко О. Г., Маркина А. К. Проблемы финансирования инновационной деятельности в России на современном этапе // *Вестник университета.* – 2019. – №. 1.
7. Дульзон А.А. Управление проектами: учеб. пособие. - Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. - 2010. – 334 с.
8. Замбрицкая Е. С., Карпенко Д. А. Выбор инвестиционных проектов в условиях ограниченности финансовых ресурсов // *Приложение математики в экономических и технических исследованиях.* – 2020. – №. 1. – С. 97-102.
9. Захарин Ю. С. Источники финансирования инвестиционных проектов // *Экономика и политика современной России: Актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей Международной.* – 2022. – С. 36.
10. Куцегреева Л. В., Наливкина В. В. Источники финансирования деятельности организации // *Сфера услуг: инновации и качество.* – 2019. – №. 43. – С. 51-69.
11. Макаров В. В., Шувал-Сергеева Н. С. Выбор источника финансирования инновации на разных этапах ее жизненного цикла: объем финансирования и качество инновации // *Вопросы радиоэлектроники.* – 2019. – №. 1. – С. 78-80.
12. Салахов А. Р. Выбор методов финансирования для инновационных проектов // *Аллея науки.* – 2021. – Т. 1. – №. 3. – С. 50-54.
13. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) — Ed. 6 /Project Management Institute, 2017. — 4 p.*
14. DIN 69 901. Begriffe der Projektwirtschaft / Deutsches Institut fuer Normung e.V. (Hrsg.) – Berlin; Köln, 2009. – 126 p.
15. Nevitt P., Fabozzi F. *Project Financing.* London //UK: Euromoney Books. - 2000.
16. Yescombe E. R. *Principles of project finance.* – Academic Press. - 2013.

## СЕКЦИЯ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

### МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ В ВУЗЕ

АКСЮТИН В.В., АНАНЬЕВА А.Я., ЗАРЕЧНАЯ Ю.С.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной статье описывается процесс создания и анализа модели качества обучения в вузе, основанной на оценке ключевых аспектов образовательной деятельности, таких как содержание учебных материалов, профессиональные и личностные качества преподавательского состава, инфраструктура и ресурсы, организация учебного процесса и уровень удовлетворенности студентов. Модель качества обучения строится на основе опроса студентов и анализа полученных данных. Результаты исследования позволят выявить сильные и слабые стороны образовательной системы вуза.

*Ключевые слова:* модель, качество обучения, высшее образование, высшее учебное заведение

#### **Введение**

В современном мире абитуриенты сталкиваются с огромным выбором высших учебных заведений. Для облегчения выбора существуют различные рейтинговые системы, оценивающие вузы по определенным критериям.

Примеры таких критериев [1]:

- академическая и научная репутация: учитывается признание вуза в научном сообществе, количество публикаций, индекс цитируемости;
- уровень востребованности выпускников работодателям;
- интернационализация: учитывает число иностранных студентов и преподавателей, наличие программ обмена и международных проектов;
- распространение знаний и инновации: оценивает вклад вуза в развитие науки и технологий, наличие патентов и инновационных разработок.

Несмотря на свою полезность, существующие рейтинги имеют существенный недостаток: они не отражают качество обучения с точки зрения студентов. Рейтинги фокусируются на внешних показателях престижа вуза, но не учитывают внутренние процессы, качество преподавания и уровень удовлетворенности студентов.

#### **Цели и задачи исследования**

Качество обучения - это комплексная характеристика, отражающая степень соответствия образовательного процесса установленным стандартам и потребностям студентов.

Цель исследования: разработать модель качества обучения в вузе, позволяющую оценить систему с точки зрения студентов и выявить ее сильные и слабые стороны.

Основной задачей исследования является оценка качества обучения с позиции непосредственных участников образовательного процесса – студентов. Это поможет вузу совершенствовать свою деятельность, повышать качество образования и создать комфортную и продуктивную образовательную среду.

В результате исследования была разработана модель качества обучения, которая может быть инструментом для анализа системы образования в вузе и повышения ее эффективности.

### Создание модели и ее анализ

Первым этапом создания модели было определение категорий, из которых может складываться конечная модель качества обучения. Анализ системы образования в вузе позволил выделить семь основных категорий, охватывающих различные аспекты образовательной деятельности:

- преподавательский состав: личностные и профессиональные качества преподавателей;
- образовательный контент: качество предоставляемого теоретического материала и практических занятий;
- дополнительные возможности для расширения знаний и навыков студентов вне основного учебного плана или рабочей программы [2].
- наличие и качество баз практик для получения профессионального опыта;
- оснащение вуза: обеспечение учебного процесса оборудованием и ПО;
- адаптация в вузе: помощь новым студентам в решении вопросов;
- организация учебной деятельности: удобство взаимодействия с сотрудниками деканата и кафедры.

Эти категории затем были разбиты на более мелкие подкатегории для более точной и детальной оценки. В некоторых случаях потребовалось создание третьего уровня подкатегорий, чтобы упростить студентам процесс оценки и сделать его более понятным. Сокращенная версия древовидной модели качества обучения представлена на Рис. 1.

Пример:

1. Категория: Преподавательский состав.

1.1. Подкатегория: Обратная связь с преподавателем.

1.1.1. Подкатегория 3 уровня: Своевременность обратной связи.

Для сбора данных о качестве обучения был разработан опросник, который заполняли студенты 3 курса бакалавриата направления «Системный анализ и управление» и 1 курса магистратуры направления «Информационные системы и технологии» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Особенности опросника:

- для большинства вопросов использовалась 5-балльная шкала;
- опросник был адаптирован для каждого направления обучения с учетом различий в преподавателях и изучаемых предметах;
- вопросы, касающиеся оснащения вуза и дополнительных возможностей, были одинаковыми для всех респондентов.

Для каждого параметра подкатегории считалось среднее значение по всем ответам респондентов. Далее проводились расчеты среднего значения всех параметров конкретной подкатегории. Результатом для каждой категории является значение, равное среднему значению по всем подкатегориям. Важно отметить, что использовалось простое среднее, а не средневзвешенное, поскольку предполагается, что все подкатегории имеют одинаковый вес в оценке.

После определения среднего значения для каждой из семи основных категорий, была рассчитана общая оценка качества обучения. Для этого каждой категории был присвоен вес, отражающий ее значимость для удовлетворенности студента образованием.

Формула расчета оценки качества обучения:

$$O_{\text{ко}} = \sum_{i=1}^n K_i * V_i,$$

где  $O_{\text{ко}}$  - оценка качества обучения,  $K_i$  – оценка категории  $i$ ,  $V_i$  – вес категории  $i$ .

Данный подход к разработке модели позволил получить комплексную оценку качества обучения с учетом мнения студентов по различным аспектам образовательного процесса.

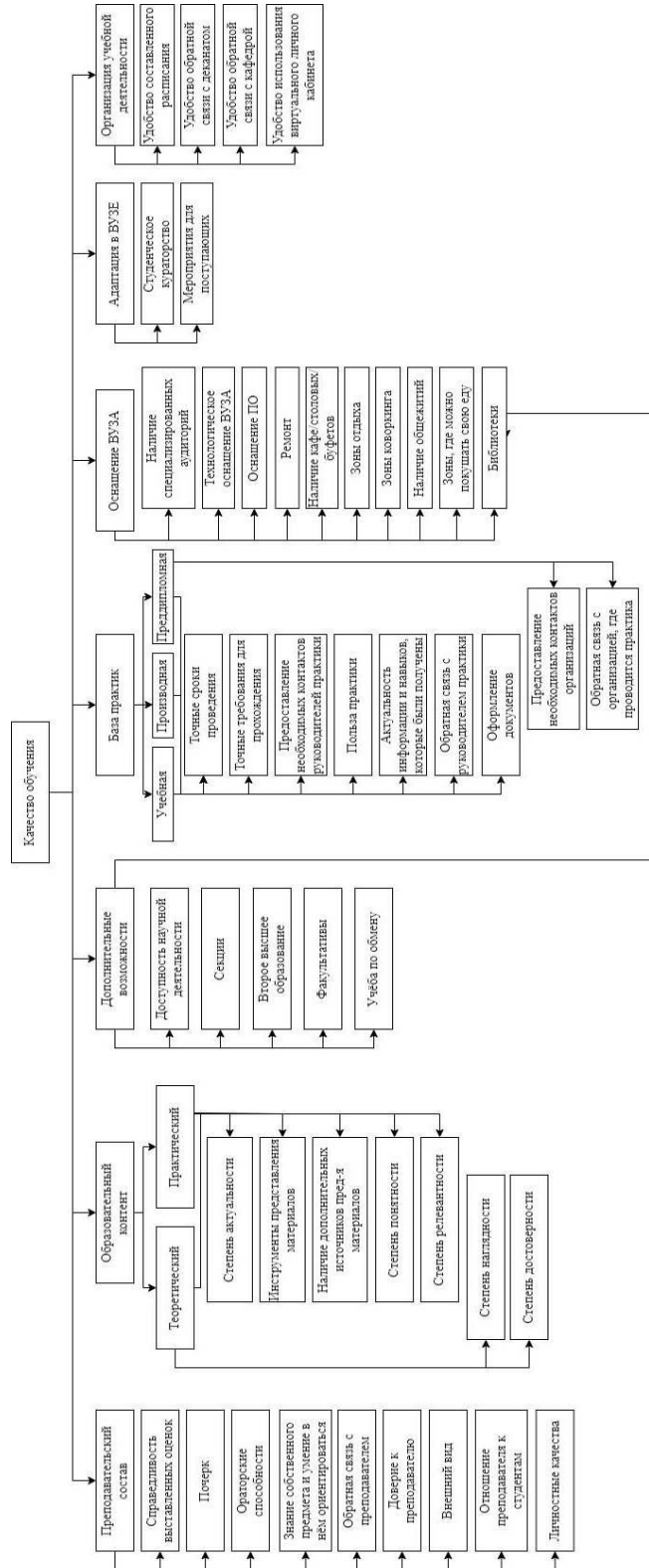


Рис. 1. Модель качества обучения

**Сравнительная таблица процентов удовлетворенности качеством обучения по категориям по результатам опроса 3 и 5 курса**

Категория	Оценка 1 курса магистратуры, % удовлетворенности	Оценка 3 курс бакалавриата, % удовлетворенности	Вес категории
Преподавательский состав	83,77	69,8	0,2
Образовательный контент	72,27	54,9	0,3
Дополнительные возможности	59,7	65,42	0,05
База практик	61,6	67,19	0,15
Оснащение вуза	74,83	67,59	0,15
Организация учебной деятельности	83,33	77,5	0,1
Адаптация в вузе	88,33	77,5	0,05
Итоговая оценка качества обучения	74,63	65,54	-

Результаты опроса показали, что среднее значение качества обучения в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» среди опрошенных студентов составляет 70,09%. Однако, при рассмотрении результатов по отдельным группам, выявляются некоторые различия.

Студенты 1 курса магистратуры в целом более удовлетворены качеством обучения (75%), чем студенты 3 курса бакалавриата (66%). Это может быть связано с тем, что студенты старших курсов имеют более продолжительный опыт обучения в вузе и сталкивались с различными проблемами, включая период дистанционного обучения.

Обучающиеся 3 курса бакалавриата наиболее критично оценили категорию «образовательный контент». Они отметили недостаточную актуальность учебных материалов и отсутствие дополнительных источников информации у практических занятий. Студенты 1 курса магистратуры выразили наибольшее недовольство категорией «дополнительные возможности». Они отметили ограниченные возможности для участия в секциях в вузе.

Обе группы студентов оценили категорию «базы практик» как средне-низкую. Они столкнулись с трудностями при поиске контактов руководителей и организаций для прохождения практики.

Наиболее высокие оценки получили категории «адаптация в вузе» и «организация учебной деятельности». Это свидетельствует об эффективной работе вуза по информированию студентов, организации учебного процесса и поддержке первокурсников.

### **Вывод**

В результате данного исследования была получена оценка качества с позиции студентов, что помогло выявить слабые места образовательного процесса. Учитывая все минусы, в будущем возможно повысить уровень удовлетворенности учащихся, что приведет к созданию более комфортной и продуктивной образовательной среде.

### **Список литературы**

1. Как определяются рейтинги вузов и на что влияют? [Электронный ресурс] URL: <https://trends.rbc.ru/trends/education/5d6965ba9a794773337665ff?from=copy> /Дата обращения (26.04.2024)

2. Что такое дополнительное образование и кому оно нужно. [Электронный ресурс] URL: <https://synergytimes.ru/evolve/что-такое-дополнительное-образование-i-komu-ono-nuzhno> /Дата обращения (27.04.2024)

## К ВОПРОСУ О СКРЫТЫХ МАЙНЕРАХ И ИХ УГРОЗЕ СОВРЕМЕННОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

БУРАВЛЕВ А.С., ДУБЕНЕЦКИЙ В.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются понятие майнера, основные способы скрытого майнинга криптовалюты, последствия от атаки на компьютерные устройства. Предлагаются профилактические меры защиты личных устройств студентов и преподавательского состава от мошеннического ПО, а также отдельная методика обнаружения майнеров с помощью программы.

*Ключевые слова образование, дистанционное обучение, информационные системы, майнеры, безопасность, вирусы, атаки, меры защиты*

### **Постановка проблемы.**

В эпоху цифровизации человечество все чаще прибегает к использованию дистанционных платформ для коммуникации, работы, образования. Дистанционное обучение стало настоящим трендом современного просвещения молодежи, включающим в себя как использование онлайн-платформ для проведения занятий, так и специализированных автоматизированных средств для проверки знаний учащихся. Наряду с развитием информационных систем и технологий, в сети появляются все более изощренные способы мошенничества, позволяющие злоумышленникам не только получить доступ к конфиденциальным данным, но и использовать мощности оборудования жертв для материального обогащения. При этом, жертвы могут даже не подозревать о намеренном использовании их персональный компьютер (ПК) в корыстных целях.

### **Введение: история майнинга, понятие майнера, скрытый майнинг.**

Для понимания сути поставленной проблемы необходимо углубиться в историю криптографии, а именно в период изобретения первого типа криптографических электронных денег, получивших название “ecash”. С их появлением в 1995 году была реализована первая платформа криптографических электронных платежей, продвигающая идею использования зашифрованных ключей для снятия банкнот из банков. Таким образом, полученную цифровую валюту невозможно отследить. В настоящее время в сети наиболее популярным типом валюты, использующей в качестве шифрования криптографическую функцию SHA-256, является Биткойн.

Bitcoin был создан Сатоши Накамото и стал первой децентрализованной криптовалютой. В обращение же данный термин был введен только в 2011 году экспертом по компьютерной безопасности и криптографом Вэй Даем. Он определил криптовалюту как «электронную денежную систему, которая использует криптографию для обеспечения безопасности транзакций и контроля создания новых единиц валюты» [1]. В данном случае стороной, занимающейся выпуском криптовалюты, может являться как частное лицо, так и отдельная компания, в связи с чем возможность ее контроля практически

отсутствует. В качестве хранилища информации о совершенных операциях выступает блокчейн, представляемый в виде цепочки блоков. Блоки связаны таким образом, что каждый новый объект цепи неразрывно связан с предыдущим за счет наличия собственного порядкового номера и хеша предыдущего блока.

Итак, процесс получения криптовалюты напрямую связан с использованием мощностей аппаратной составляющей ПК для вычисления хешей новых блоков в цепочке блокчейна.

Понятие майнинга (технология создания новых блоков и обеспечения эмиссии) можно обозначить как совершение математических операций для получения вознаграждения в виде новых биткойнов. Стоит отметить, что процесс майнинга криптовалюты требует значительных затрат на электроэнергию, оборудование и техническое обслуживание, но также предоставляет возможность получать доход от инвестирования в криптовалюту [2]. Именно поэтому злоумышленники, одержимые желанием минимизировать траты на добычу биткойнов, используют чужие ПК ничего подозревающих пользователей.

Если ранее майнинг рассматривался как процесс создания новых блоков в блокчейне для получения соответствующего вознаграждения, то под понятием скрытого майнинга подразумевается использование вредоносного программного обеспечения (ПО), предназначенного для добычи криптовалюты с использованием вычислительных мощностей чужого оборудования. В большинстве случаев жертвы даже не подозревают о том, что их устройство находится под контролем вирусной программы, при этом, возможный ущерб отдельным комплектующим персонального компьютера в первую очередь зависит от временного цикла первичного заражения до непосредственного обнаружения и последующего удаления вируса с рабочего устройства.

### **Основные способы скрытого майнинга**

В качестве классификации скрытых майнеров можно выделить два конкретных способа получения биткойнов:

- Браузерный майнинг;
- Вирусы-майнеры;

Достаточно типичным сценарием заражения с помощью браузерного майнинга является переход по вредоносной ссылке, ведущей на несертифицированный ресурс. Данный переход активизирует специализированный скрипт с вредоносным кодом, позволяющий злоумышленнику использовать вычислительные мощности ПК пользователя пока он находится на данном ресурсе. Второй способ в отличие от предыдущего характеризуется возможностью возобновляемого потребления мощностей оборудования до момента отключения компьютера от сети. Таким образом, при повторном включении оборудования вирус продолжит добычу криптовалюты. В случае с вирусным майнингом стать жертвой заражения можно не только при переходе по ссылке, но и установив какую-либо программу с неофициального источника. Принцип работы подобного вирусного ПО заключается в возможности подключения установленной программы к серверу, отвечающему за распределение вознаграждения при успешном занесении соответствующего блока в блокчейн между участниками данной махинации. Наряду с этим, Злоумышленник, на реквизиты которого поступают выплаты, способен держать под контролем множество зараженных устройств без требования доказательств, что конкретные вычислительные машины принадлежат ему.

### **Последствия от атаки на ПК, потенциальные группы риска.**

Столкнуться с майнерами может любой участник всемирной паутины, при этом, в потенциальную группу риска входят как студенты, так и преподаватели высших учебных заведений. В условиях дистанционного образования учащиеся сталкиваются с множеством онлайн-платформ для обучения и наиболее популярными средствами для коммуникации являются мессенджеры и почта Mail. Слушатели образовательных курсов вынуждены часто переходить по ссылкам, ведущим на различные обучающие ресурсы, а также скачивать специализированные программы для выполнения практических и лабораторных работ. В процессе дистанционного обучения преподаватели тоже так или иначе обращаются к различным информационным источникам для поиска наиболее актуальных материалов для студентов. В протекающей политической изоляции, множество крупных производителей лицензионного программного обеспечения ушли из РФ, в связи с чем, в обиход часто вступают аналоги, предлагающие тот же продукт, но из неофициального источника. Такая ситуация становится наиболее благоприятной для злоумышленников, использующих вирусные программы.

Главным аспектом, на который опираются мошенники, является неосведомленность пользователя о том, что его ПК заражен. В диспетчере задач майнер маскируется под полезную утилиту и некоторое время может не проявлять признаки активности, но в определенный момент способен выдать тяжелую нагрузку на центральный процессор. Исходя из вышеуказанного, под постоянными нагрузками срок стабильной работы отдельных комплектующих вычислительной машины значительно сокращается вплоть до полного выхода из строя. Помимо этого, под контролем майнера устройство не способно справляться с предъявляемыми к нему ресурсоемкими задачами, что приводит к заторможенным реакциям на действия пользователя со стороны ПК, а иногда и вовсе к аварийному выключению. Вследствие чего, обосновывается конкретная необходимость в защите учащихся и преподавателей от вредоносного ПО.

### **Профилактические меры защиты от скрытого майнинга.**

Итак, для того, чтобы устранить попытку использования компьютера для майнинга, нужно убедиться, что устройство заражено. Первый признак, рассмотренный ранее – это снижение скорости работы ПК и увеличение потребление энергии. К сожалению, торможение компьютера – единственный признак, с помощью которого можно определить, что он заражен вирусом [3].

На данный момент существуют несколько профилактических мер, способных защитить ПК студентов и преподавательского состава от мошеннического ПО при дистанционном формате проведения занятий:

- установка утилиты “Anti-WebMiner”, а также браузерного расширения “NoCoin”;
- отключение JavaScript в браузере и применение “NoScript”;
- добавление антимайнинговой защиты в “AdBlock”, а также “uBlock”[3];
- регулярная проверка адресатов писем в почтовом ящике Mail.ru;
- контроль работы защитника Windows и его обновление;
- систематическая проверка утилит, осуществляющих нагрузку на ПК в диспетчере задач;
- при переходе на сторонние ресурсы по сомнительным ссылкам необходимо убедиться, что источник имеет соответствующий сертификат безопасности;
- отключение в браузере разрешений на автоматическое скачивание и редактирование файлов на сайтах;



- не переходить по ссылкам от непознанных адресатов и не применять ввод активационных ключей на сайтах от непроверенных источников.

#### **Предложенная методика защиты в виде программы.**

Несмотря на объемное количество представленных профилактических мер для защиты персонального компьютера, не существует универсального способа борьбы с майнерами, однако, в рамках данной работы предлагается создать программу, способную вычислить потенциальную угрозу в виде зловредного ПО.

В предыдущих тезисах ранее была определена специфика добычи криптовалюты на зараженном устройстве, а именно о загрузке центрального процессора ПК в определенные промежутки времени. При этом, большинство майнеров при запуске диспетчера задач на персональном компьютере могут скрыть свою активность. Опираясь на полученные данные, целесообразно пошагово представить методологию работы разрабатываемой программы:

1. Запуск программы.
2. Получение данных о всех запущенных процессах на ПК.
3. Обнаружение процесса на устройстве, осуществляющего продолжительную нагрузку на центральный процессор (30-40% загруженности).
4. Сбор данных об обнаруженном процессе (время обнаружения, исходное приложение, дата его создания, описание и тд.).
5. Определение уровня опасности приложения на основе собранных данных.
6. Вывод пользователю информационного уведомления о возможной угрозе, содержащего собранные данные, включая путь к исходному приложению, осуществляющему нагрузку.
7. Завершение цикла работы программы.

Предполагается цикличная работа программы каждый час на персональном компьютере пользователя. При этом, в рамках проектирования не предполагается наличие функциональной возможности автоматизированного удаления процесса, представляющую возможную угрозу компьютеру поскольку необходимо создание специализированного механизма, способного отличить системный файл от замаскированного вируса. Применение программы в первую очередь связано с профилактикой обнаружения потенциальной опасности для ПК в виде майнера. На основании полученных результатов работы приложения, пользователю предоставляется возможность перейти по указанному пути до запущенного файла и при необходимости проверить его с помощью встроенных средств защитника Windows.

Предложенная методика может стать эффективным методом профилактики для защиты личных персональных компьютеров учащихся и преподавательского состава учреждений высшего образования за счет своевременного информирования о возможной угрозе. Тем не менее, для основательных выводов необходимы статистические данные о работе приложения, получение которых возможно по средствам дальнейшей разработки и тестировании программы.

Исходя из вышеизложенного, майнеры по сей день представляют угрозу не только современному образованию, но и любому передовому пользователю интернета. Несмотря на то, что майнинг является очень сложным вычислительным процессом, преподаватели и учащиеся, имеющие базовое представление о данном понятии, способны не только защитить свое персональное устройство от преждевременного старения отдельных комплектующих, но и обезопасить свои личные данные от злоумышленников. При этом,

необходимо учитывать, что скрытые майнеры, как и любое другое вредоносное ПО постоянно совершенствуются, а значит даже приведенные меры профилактики в определенных случаях не способны полностью защитить персональный компьютер от атак.

### Список литературы

1. Кукин М. Ю. Ситуация на рынке криптовалют: анализ и перспективы // Вестник науки и образования. 2021. №7. С. 112.
2. Кляхин А. Е. Криптовалюта как финансовый инструмент современной экономики: сборник трудов конференции / А. Е. Кляхин, Э. В. Чиянова // Актуальные проблемы менеджмента, экономики и экономической безопасности: материалы V Междунар. науч. конф. Костанай, 5 дек. 2023 г. Чебоксары: ИД «Среда», 2023. С. 254-257.
3. Полешук О.А. Черный майнинг. Как работают вирусы-майнеры. Защита компьютеров от вирусов // Репозитарий БНТУ. Научный доклад 4 с. Дата публикации в реестре:28.02.2020.

## АНАЛИЗ КОНВЕРСИИ И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ПОВЕДЕНИЯ: КАК УЛУЧШИТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВАШЕГО САЙТА

ДЗЕЙН Д. Ю.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Статья предлагает подробный анализ конверсии и пользовательского поведения на сайте с целью оптимизировать его производительность. В статье исследуются различные факторы, влияющие на конверсию, такие как дизайн, контент, навигация и скорость загрузки страниц. В статье также представлены практические советы по улучшению пользовательского опыта и увеличению конверсии на сайте. Эта статья будет полезна веб-разработчикам и маркетологам, которые стремятся повысить эффективность своего сайта и увеличить конверсию.

*Ключевые слова:* конверсия, пользовательское поведение, анализ, производительность, улучшение сайта, оптимизация, дизайн, контент, навигация, скорость загрузки, пользовательский опыт, эффективность, увеличение конверсии, веб-сайт.

### Введение

Конверсия — это процент посетителей вашего веб-сайта, которые выполняют желаемое действие, такое как совершение покупки, подписка на рассылку, заполнение формы обратной связи и т. д. Высокий уровень конверсии означает, что сайт эффективно привлекает и удерживает пользователей, превращая их в активных клиентов или подписчиков. Конверсия играет ключевую роль в успешности веб-сайтов, так как она напрямую влияет на их эффективность, рентабельность и репутацию. Высокая конверсия свидетельствует о том, что сайт привлекает целевую аудиторию, предлагает им нужный контент или продукцию, удовлетворяет их потребности и стимулирует к действию. Это помогает увеличить продажи, подписки, заявки и другие виды конверсии, что в свою очередь способствует росту бизнеса и достижению поставленных целей.

Анализ пользовательского поведения играет ключевую роль в повышении конверсии веб-сайта, поскольку позволяет понять, как пользователи взаимодействуют с сайтом, какие шаги они предпринимают, а также выявить возможные причины низкой конверсии и оптимизировать процессы на сайте.

### **Инструменты для получения данных о поведении пользователей**

Рассмотрим инструменты, которые помогают получить данные о поведении пользователей на веб-сайтах:

1. Google Analytics — это бесплатный сервис от Google, который позволяет отслеживать и анализировать поведение пользователей на сайте. С помощью Google Analytics можно узнать, откуда приходят посетители, какие страницы они посещают, как долго они на них задерживаются, какие действия они совершают и многое другое.

2. Hotjar — это инструмент для анализа поведения пользователей на сайте, который позволяет записывать сеансы посещения сайта, анализировать тепловые карты (heatmap) для определения наиболее посещаемых областей страницы, проводить опросы и получать обратную связь от посетителей.

3. Crazy Egg — это инструмент для анализа поведения пользователей на сайте, который представляет информацию в виде тепловых карт, карт кликов (click maps) и скролл-карт (scroll maps).

### **Проведение анализа веб-сайта или мобильного приложения**

Для анализа поведения пользователей на сайте можно использовать следующие ключевые метрики:

1. Количество посещений (Sessions) - показывает общее количество посещений сайта за определенный период времени.

2. Уникальные пользователи (Users) - количество уникальных посетителей, которые зашли на сайт.

3. Среднее время на сайте (Average Session Duration) - среднее время, которое пользователи провели на сайте за одну сессию.

4. Количество просмотренных страниц (Pageviews) - общее число страниц, открытых пользователями на сайте.

5. Среднее количество просмотренных страниц на сессию (Pages per Session) - количество страниц, просмотренных пользователями в среднем за одну сессию.

6. Показатель отказов (Bounce Rate) - процент пользователей, покинувших сайт после просмотра только одной страницы.

7. Конверсии (Conversions) - количество пользователей, совершивших целевое действие на сайте (например, оставивших заявку или совершивших покупку).

Анализ этих метрик поможет понять, как пользователи взаимодействуют с сайтом, выявить проблемные моменты и оптимизировать пользовательский опыт для увеличения конверсии и удержания посетителей на сайте.

Рассмотрим основные типы конверсий:

1. Конверсия посетителей в покупателей — это самый распространенный тип конверсии, когда посетители веб-сайта совершают покупку товара или услуги.

2. Конверсия подписчиков — это процесс превращения посетителей в подписчиков рассылки или сообщества, чтобы они получали регулярные обновления и информацию от веб-сайта.

3. Конверсия в лиды — целью этого типа конверсии является привлечение пользователей, которые проявляют интерес к продукту или услуге, но еще не готовы совершить покупку.

4. Конверсия в регистрацию — веб-сайт может преобразовывать посетителей в зарегистрированных пользователей, чтобы предоставить им доступ к определенным функциям или контенту.

5. Конверсия в просмотры страниц—в этом случае целью является увеличение количества просмотров страниц на сайте с целью улучшения его показателей.

6. Конверсия в установку приложения — для мобильных приложений это тип конверсии, когда пользователи устанавливают приложение после посещения веб-сайта.

Рассмотрим, как происходит анализ пользовательского интерфейса веб-сайта:

1. Идентификация узких мест: анализ поведения пользователей поможет выявить узкие места на сайте, где пользователи чаще всего отказываются от совершения действия. Это может быть неудобная навигация, длительное время загрузки страниц, неясные сообщения или другие проблемы, которые мешают пользователю выполнять желаемые действия.

2. Оптимизация пользовательского опыта: понимание того, как пользователи взаимодействуют с сайтом, поможет оптимизировать его структуру, дизайн. Также помогает улучшить контент и функциональность, чтобы сделать пользовательский опыт более удобным, привлекательным и интуитивно понятным. Это может помочь увеличить привлекательность сайта для пользователей и способствовать увеличению конверсии.

3. Тестирование и оптимизация: на основе данных об анализе пользовательского поведения можно проводить A/B-тестирование и другие виды тестирования, чтобы определить эффективность изменений на сайте и выбрать оптимальные варианты, которые повысят конверсию. Анализ пользовательского поведения поможет понять, какие изменения на сайте действительно влияют на поведение пользователей и приводят к увеличению конверсии.

Улучшить производительность сайта можно следующими способами:

1. Оптимизация пользовательского интерфейса и навигации: для улучшения пользовательского опыта необходимо упростить навигацию по сайту, сделать интерфейс более интуитивным и удобным для пользователей. Разместить важные функции и элементы управления на видном месте, чтобы пользователи могли быстро находить нужную информацию.

2. Оптимизация скорости загрузки страницы: для ускорения загрузки страницы следует оптимизировать размер изображений и видео, минимизировать количество HTTP-запросов, использовать кэширование и сжатие файлов. Также необходимо выбирать оптимальный хостинг и использовать CDN для распределения контента.

3. Создание привлекательного контента и call-to-action элементов: чтобы привлечь внимание пользователей, важно создавать качественный и интересный контент, который будет релевантен для целевой аудитории. Следует использовать эффективные call-to-action элементы, которые будут мотивировать пользователей к действию, такие как кнопки "Подписаться", "Купить сейчас" или "Узнать больше".

Несколько советов по улучшению конверсии сайта:

- создание привлекательного и интуитивно понятного дизайна;
- оптимизация скорости загрузки страницы;
- улучшение контента и удобства навигации сайта;
- внедрение возможности обратной связи и улучшение сервиса поддержки;
- использование психологических триггеров для увеличения конверсии;
- регулярное обновление контента и добавление новых функциональностей;

- разработка персонализированных предложений и акций для пользователей.

### **Вывод**

В целом, систематический анализ конверсии и пользовательского поведения играет ключевую роль в успешности веб-сайта. Проведение А/В тестирования, анализ результатов, корректировка стратегии, а также постоянное отслеживание показателей и внесение изменений необходимо для постоянного улучшения пользовательского опыта и повышения конверсии. Улучшение дизайна, контента, навигации, скорости загрузки, а также использование психологических триггеров и персонализированных подходов помогут привлечь и удержать посетителей на сайте, повысить конверсию и достичь успеха в онлайн-бизнесе.

### **Список литературы**

1. Джон Шеррууд, «Конверсия: как заставить посетителей действовать», г. Москва, 2017. 320 с.
2. Стив Крук, «Как улучшить пользовательский опыт на сайте», Лондон, 2019. 240 с.
3. Неил Уиллсон, «Психология веб-дизайна», Нью-Йорк, 2015. 200 с.
4. Дэвид Гроу, «UX/UI дизайн: теория и практика», Сан-Франциско, 2016. 280 с.
5. Эрик Энгельбарт «SEO-маркетинг: оптимизация сайтов под поисковые системы», Берлин, 2018. 350 с.

## **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ИНТЕРФЕЙСА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

КАШЛИКОВА М.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*

*им. В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена важность проектирования интерфейса, ведь простой и интуитивно понятный интерфейс пользователю – то, к чему нужно стремиться. Спроектировав все качественно, можно повысить удовлетворенность пользователей, улучшить продуктивность работы и снизить количество ошибок. При создании интерфейса необходимо следовать основным принципам и этапам разработки, а также проводить исследования(анализ), которые выявят слабые зоны интерфейса.

*Ключевые слова:* проектирование интерфейсов, пользовательский опыт, UX/UI-дизайнер, дизайн, тестирование, целевая аудитория, пользователь, UX-исследования, анализ.

Проектирование интерфейсов необходимо для создания удобного и функционального пользовательского опыта при взаимодействии с программным обеспечением, веб-сайтами или другими IT-системами. Главная цель проектирования интерфейсов - сделать использование продукта простым, интуитивно понятным и эффективным для пользователей. Спроектировав все качественно, можно повысить удовлетворенность пользователей, улучшить продуктивность работы и снизить количество ошибок при взаимодействии с системой.

Разработкой, созданием и анализом таких систем занимается UX/UI-дизайнер. В его задачи входит:

1. Исследование пользовательских потребностей и поведения, проведение пользовательских тестов для понимания потребностей и ожиданий пользователей, а также формулировка и проверка гипотез.

2. Разработка информационной архитектуры, создание прототипов для визуализации структуры и функционала продукта.

3. Дизайн интерфейса, создание эстетически привлекательного дизайна, учитывающего бренд-идентичность и требования к навигации.

4. Оптимизация пользовательского опыта, обеспечение удобного и интуитивно понятного взаимодействия с продуктом.

5. Тестирование и итерационное улучшение дизайна на основе обратной связи пользователей.

6. Сотрудничество со специалистами по разработке и другими участниками команды для реализации дизайн-решений.

Итак, основные принципы проектирования интерфейса:

1. Принцип доступности. Интерфейс должен быть интуитивно понятен для пользователя, легко доступен и удобен в использовании. Все элементы управления должны быть легко обнаруживаемы и понятны.

2. Принцип использования предыдущего опыта. Элементы интерфейса следует располагать в уже привычных для пользователя местах, чтобы поиск необходимого не отнимал много времени.

3. Принцип минимализма. Интерфейс не должен быть перегружен лишними элементами и функциями. Лучше всего использовать минимум элементов для достижения максимального результата.

4. Принцип оповещения. Система должна реагировать на действия пользователя немедленно и предсказуемо. На каждом этапе взаимодействия с системой пользователь должен понимать, что происходит, иначе задержки и ошибки могут вызвать недовольство и снизить производительность.

5. Принцип наглядности. Интерфейс должен быть понятен и нагляден. Все элементы должны быть ясно обозначены и легко распознаваемы.

6. Принцип кастомизации. Хорошее решение – дать возможность пользователю настроить интерфейс под себя.

7. Принцип подсказок. Чтобы избежать ошибок во время прохождения сценария, необходимо "помогать" пользователю (например, всплывающее окно с подтверждением: «Вы действительно хотите очистить корзину?»)

Проектирование интерфейса стоит разделить на несколько этапов:

1. Исследование и анализ: в этом этапе происходит изучение целевой аудитории, ее потребностей и поведения, анализ конкурентов и требований к продукту.

2. Создание информационной архитектуры: на этом этапе определяется структура и организация контента, разрабатывается структура навигации и создаются макеты.

3. Дизайн интерфейса: дизайнер разрабатывает визуальное оформление интерфейса, создает UI-элементы, цветовую палитру, типографику.

4. Прототипирование: создание прототипа для демонстрации функционала и взаимодействия пользователей с интерфейсом.

5. Тестирование и итерации: тестирование прототипа на реальных пользователях, сбор обратной связи для последующей корректировки дизайна и повышения удовлетворенности пользователей.

6. Разработка и внедрение: передача разработчикам готового дизайна для его реализации в продукте.

7. Мониторинг и оптимизация: постоянный мониторинг пользовательского опыта, сбор данных о поведении пользователей, анализ и оптимизация интерфейса для повышения его эффективности.

Анализ интерфейса информационных систем включает в себя оценку, изучение и определение различных аспектов интерфейса пользовательского взаимодействия. Это может быть: изучение требований пользователя, анализ функциональности интерфейса, тестирование интерфейса, а в заключение анализ результатов и выявление улучшений.

Исследования делятся на 2 вида: количественные и качественные. Первые нужны для таких запросов, как «Сколько пользователей кликают на эту кнопку?» и так далее. Вторые – «Почему пользователи игнорируют эту кнопку?».

Для каждого из видов существуют методы исследований, выбор которых зависит от задач и ресурсов компании.

### **Список литературы**

1. Головач В. Дизайн пользовательского интерфейса. Искусство мыть слона.
2. Алан Купер. Психбольница в руках пациентов.

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ – НЕОБХОДИМЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРИ ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ**

КОЛОСОВ Е.Д., ТКАЧЕВ А.С., МАТВЕЕВ Д.А, ШПАКОВСКИЙ ., Н.Ф.

*Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебный и испытательный)  
Тамбов, Россия*

**Аннотация.** В данной статье происходит разбор такого инструмента как системный анализ. Показана его важность при защите информации в системе.

*Ключевые слова:* системный анализ, защита информации

В современном мире становится все больше различных систем, сильно влияющих на жизнь людей. В данном случае под системой может пониматься как предприятие в целом, так и какое-либо программное обеспечение. Системы выполняют различные задачи и, как правило, могут быть очень сложными и состоять из множества других подсистем. Отсюда можно сделать вывод, что система – это совокупность взаимосвязанных компонентов (подсистемы, отношения между компонентами), взаимодействующих между собой для выполнения поставленных задач.

Системы могут быть как обычными, так и критически важными. К таким системам можно отнести:

- банковские системы;
- системы телекоммуникации;
- системы управления воздушным и наземным транспортом;
- системы обработки и хранения секретной и конфиденциальной информации.

На самом деле подобных критически важных систем гораздо больше. Объединяет их то, что «для нормального и безопасного функционирования этих систем необходимо поддерживать их безопасность и целостность» [1].

Защита информации в таких системах является одной из важнейших задач.

Перед тем, как приступить к обеспечению защиты информации в системе, предлагается использовать такой инструмент, как системный анализ. Под системным анализом понимается совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений проблем, связанных с функционированием сложных систем.

Цель системного анализа состоит в том, чтобы выявить первопричину нежелательных событий, возникающих во время работы системы. Кроме того необходимо будет разрабатывать ряд мероприятий, которые либо уменьшают вероятность появления этих событий, либо полностью исправляют возникшую проблему.

Системный анализ можно применять в двух случаях:

- 1) На этапе проектирования системы;
- 2) В функционирующей системе.

В первом случае анализ выполняется до наступления нежелательных событий. То есть происходит прогнозирование возможных проблем. Такой анализ называется априорным.

Во втором случае анализ выполняется, как правило, после наступления нежелательных событий и называется апостериорным. Одной из целей данного анализа является разработка рекомендаций по избеганию подобных проблем в будущем.

В обоих случаях системный анализ включает ряд основных шагов по устранению проблемы:

1. Определение проблемы. Это включает в себя определение масштаба проблемы и выявления проблемных областей. Очень важно собрать всю необходимую информацию о данной проблеме для ее полного понимания;
2. Анализ проблемы. Данный шаг подразумевает анализ всех собранных данных для выявления первопричины проблемы;
3. Разработка потенциального решения. На данном этапе происходит разработка и разбор всех возможных решений проблемы. Определяются их плюсы и минусы;
4. Оценка потенциального решения. Здесь происходит оценка каждого решения. Могут учитываться различные факторы, такие как стоимость, сложность реализации, влияние на другие компоненты системы и многие другие;
5. Реализация решения. Финальный шаг, который включает в себя внедрение выбранного решения и мониторинг его эффективности в течение определенного времени;
6. Составление документации. Необязательный шаг, который подразумевает документирование проблемы и ее решения. Пишутся рекомендации по избеганию подобных проблем в будущем.

Следуя этим шагам, можно обеспечить правильное функционирование системы.

Какие-либо шаги при проведении системного анализа могут добавляться или изменяться. Все зависит от самой системы.

При выполнении системного анализа одной из главных задач является реализация безопасности и целостности системы. В первую очередь, необходимо оценить риски и определить уязвимости системы.

Применение системного анализа позволяет определить факторы, влияющие на производительность и надежность системы, а также выявить угрозы безопасности и возможные пути их решения. Для этого необходимо провести анализ данных, проанализировать существующие угрозы и уязвимости, а также разработать стратегию повышения безопасности системы. Следует понимать, что нарушение информационной



безопасности системы может привести к потере данных, нарушению репутации, а также к финансовым потерям.

Как видно, системный анализ помогает определить множество проблем в системе, включая проблемы, связанные с защитой информации.

После применения системного анализа можно приступать к поиску средств защиты информации (СЗИ). Сейчас существуют различные СЗИ. Например, аппаратные и программные средства, физические меры, организованные мероприятия, законодательные меры.

К аппаратным методам защиты можно отнести электронные, электронно-механические и электронно-оптические устройства. Таких средств сейчас создано довольно много. Особую и получающую наибольшее распространение группу аппаратных средств защиты составляют устройства для шифрования информации.

К программным методам защиты можно отнести особые программы, выполняющие функции защиты данных, например, от вредоносных программ. Чаще всего используют именно программные средства защиты, так как они являются более универсальными и просты в использовании.

Резервное копирование также является одним из основных СЗИ. Оно предназначено для хранения копий данных или программ на каком-либо носителе. Резервное копирование необходимо для восстановления программ или данных в оптимальное состояние после повреждений в результате сбоя или хакерских атак.

К организационным мерам можно отнести обучение пользователей. Пользователи должны быть обучены, как правильно работать с информацией, как обнаруживать и сообщать об угрозах безопасности и какие меры безопасности следует принимать при работе с конфиденциальной информацией.

В заключении можно сказать, что каким бы превосходным не оказался системный анализ, какие СЗИ не использовались бы, полной гарантии безопасности информации быть не может, но при этом сильно увеличится уровень готовности системы к различным проблемам.

### **Список литературы**

1. Прокофьев О.В. Защита информации и информационная безопасность, 2019. – 240 с.

## **АРХИТЕКТУРА И СТЕК ТЕХНОЛОГИЙ В РАЗГОВОРНОЙ ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ PERPLEXITY AI**

КРАВЧУК Н.С.<sup>1</sup>, ГЖИМАЛАУСКАС А. Ю.<sup>1</sup>, КИРСАНОВ А.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

*им. В.И.Ульянова (Ленина)*

<sup>2</sup>*Unirock Partners*

**Аннотация.** В последнее время нейронные сети обретают все большую популярность, в том числе благодаря большим языковым моделям, способным генерировать ответы на вопросы пользователя в формате диалога. Разработчики из Сан-Франциско создали поисковую систему Perplexity.AI, обобщающую результаты поиска для выдачи прямого ответа. В статье рассмотрены технологии, используемые в разговорной поисковой системе, определены их области применения.

*Ключевые слова: разговорная поисковая система, большая языковая модель, Perplexity.AI*

Работа выполнена в рамках исследования по разработке научного классификатора информационных систем (НКИС) [PQSDA, 19.03.2024, находится в процессе публикации], который создается для систематизации имеющегося множества разнообразных информационных систем, в частности, корпоративных.. Научный классификатор информационных систем - это метод организации и категоризации информационных систем на основе их ключевых признаков.

Для создания востребованного классификатора:

- 1) он не должен описывать всевозможные ИС;
- 2) нужно определить его направленность, причем она должна быть актуальной на текущий момент и востребована на протяжении нескольких лет вперед;
- 3) необходимо определиться будет ли он применим только для конкретной страны или же общим для любой территории.

Одной из задач при построении классификатора является создание автоматизированных средств для поиска и обработки информации в интернете, так как ручной способ поиска и идентификации информационных систем представляется нецелесообразным.

В статье представлен результат анализа архитектуры и стека используемых информационных технологий в новейшей разговорной поисковой системе Perplexity AI.

Задачей анализа является определение ключевых информационных технологий, используемых для классификации данных с целью оценки перспектив их использования при создании НКИС.

При создании НКИС одной из задач, поставленных авторами, является изучение современных технологий по сбору и обработке информации в интернете. Одной из таких является Perplexity.AI - разговорная поисковая система, разработанная американским стартапом из Сан-Франциско. Для финансирования проекта была привлечена группа инвесторов, включая Джеффа Безоса, основателя Amazon. Общий объем инвестиций составил 73,6 миллиона долларов [1].

Perplexity AI представляет из себя чат-бота, отвечающего на вопросы пользователя, используя предикативный текст на естественном языке. В отличие от традиционной поисковой системы, которая отвечает на запросы, предоставляя ссылки, Perplexity.AI обобщает результаты, чтобы дать прямой ответ, и дополнительно предоставляет ссылки на используемые источники информации.

Perplexity.AI использует языковую модель, основанную на OpenAI GPT-3.5 [2], совмещённой с собственной большой языковой моделью (LLM), включающей механизмы обработки естественного языка (NLP) [2].

Perplexity Pro имеет доступ к GPT-4, Claude 2 и экспериментальной модели Perplexity[2].

Обзор используемых технологий следует начать с основной модели, позволяющей Perplexity.AI взаимодействовать с пользователем в формате диалога.

GPT-3 – разработанная компанией OpenAI LLM, имеющая архитектуру на основе трансформера [4]. Архитектура трансформера создана исследователями из Google Brain для обработки последовательных данных. Она использует структуру кодер-декодер и включает стек слоев внутреннего внимания [4].

Слой внимания фиксирует отношения между различными частями внутри одного предложения путем упаковки пар ключ-значение в вычислительную матрицу [3]. При

помощи этой матрицы нейронная сеть определяет контекстуальную важность слова внутри предложения вне зависимости от его положения. Это позволяет ему учитывать контекст каждого слова и генерировать более точные и актуальные ответы.

Архитектура GPT-3 состоит из 6 частей [3]:

- 1) Кодирование входных данных
- 2) Энкодеры трансформера
- 3) Контекстуальная информация
- 4) Декодеры и языковые генераторы
- 5) Масочное моделирование языка [5]
- 6) Выход модели

GPT-3 имеет 175 миллиардов параметров, а процесс обучения включает в себя обучение без контроля на массивном объеме общедоступных текстовых данных из интернета. Благодаря этому GPT-3 приобрел широкое понимание языка и может генерировать человекоподобные тексты на различные темы [4].

GPT-3.5 создан на основе GPT-3 с привлечением экспертов. Для GPT-3.5 используется обучение с подкреплением для противодействия *дезинформации*, насилию, ненависти, сексизму и прочему [6].

Также Perplexity.AI использует BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) [7] – модель обработки естественного языка, разработанную компанией Google. Она подходит для множества задач, например формирование ответов на вопросы и формирование рассуждений на естественном языке.

BERT применяет двунаправленное обучение трансформеров к языковому моделированию. Этот подход идет в разрез с предыдущими работами, которые рассматривали текстовую последовательность либо только слева направо, либо сочетали обучение слева направо и справа налево. Языковая модель с двунаправленным обучением способна достичь более глубокого понимания языкового контекста и потока, чем однонаправленные языковые модели.

В системе Perplexity.AI BERT предназначен для улучшения качества языковых ответов.

Представленная компанией Facebook RAG (Retrieval Augmented Generation) [8] помогает Perplexity.AI выдавать пользователям релевантные ответы, добавляя к запросу пользователя контекстную информацию, найденную в интернете.

Основной алгоритм работы RAG:

1. Вся база знаний делится на куски текста от 100 до 1000 слов, называемые чанками.
2. Чанки текста оцифровываются и превращаются в векторы, содержащие смысл текста.
3. Полученные векторы хранятся в базе данных, по которой проводится поиск наиболее релевантных запросу чанков.
4. При получении запроса от пользователя LLM текст запроса кодируется тем же алгоритмом. По вектору запроса производится поиск необходимой информации в базе данных.
5. При формировании ответа языковая модель получает в качестве контекста не только запрос пользователя, но и тексты чанков, соответствующие найденным в базе векторам. На основе полученных данных LLM формирует релевантный ответ.

Чтобы управлять нагрузкой PerplexityBot[9] – собственная разработка Perplexity, разделяет информационные ресурсы на домены, которые обновляются с большей или

меньшей срочностью. Новостные сайты обновляются чаще, чем раз в час. Сайты, которые вряд ли быстро изменятся, напротив, обновляются раз в несколько дней.

Таблица 1

**Описание используемых информационных технологий в PerPlexity**

Технология	Применение
GPT-3.5	Обработка естественного языка, генерация ответов на вопросы
BERT	Улучшение контекстуального понимания и точности анализа
RAG	Добавление контекстной информации к ответу
PerplexityBot	Индексирование интернет-ресурсов

**Заключение**

Таким образом можно сделать вывод, что для классификации информации PerPlexity.AI использует множество передовых технологий, преимущественно основанных на нейронные сетях. Языковые модели с миллионами параметров обучаются на огромных объемах данных для извлечения смысла вопроса пользователя и определения тематики текста внешнего ресурса.

Целью работы было изучение стека технологий разговорной поисковой системы PerPlexity.AI с точки зрения целесообразности использования ее элементов при создании НКИС. По итогам анализа архитектуры PerPlexity.AI можно порекомендовать обратить внимание на RAG и PerPlexityBot.

RAG технология позволяет модели обращаться к внешним источникам данных, извлекая релевантную информацию из базы знаний. В качестве источников для RAG могут использоваться различные исследования, статистические данные и новостные материалы, соответствующие заданной предметной области. Правильно выбирая базу знаний, с использованием RAG можно значительно упростить задачу классификации информации.

PerPlexityBot – модуль для индексирования источников, позволяющий своевременно обновлять источники информации. Более глубокое изучение алгоритмов индексации интернет-ресурсов способно существенно ускорить выполнение задачи классификации

**Список литературы**

1. Perplexity AI [электронный ресурс] // URL: <https://www.perplexity.ai/> (дата обращения: 04.03.2024).
2. Jeff Bezos-Backed Perplexity AI Raises \$20M Funding" // Quartz. [электронный ресурс] // URL: <https://qz.com/jeff-bezos-perplexity-ai-investment-funding-1851324766> (дата обращения: 04.03.2024).
3. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I. (2017). Attention Is All You Need.
4. Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., Hesse, C., Chen, M., Sigler, E., Litwin, M., Gray, S., Chess, B., Clark, J., Berner, C., McCandlish, S., Radford, A., Sutskever, I., Amodei, D. (2020). Language Models are Few-Shot Learners.
5. Salazar, J., Liang, D., Nguyen, T. Q., Kirchoff, K. (2019). Masked Language Model Scoring.
6. "Recent advances in large language models" // ScienceDirect. [электронный ресурс] // URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949719123000456> (дата обращения: 04.03.2024).
7. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., Toutanova, K. (2018). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. ArXiv. <https://arxiv.org/abs/1810.04805>
8. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W.-T., Rocktäschel, T., Riedel, S., Kiela, D. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. ArXiv. [электронный ресурс] // URL: <https://arxiv.org/pdf/2005.11401.pdf> (дата обращения: 09.03.2024).
9. "Perplexity AI: The Quest to Build the World's Most Powerful AI Platform" // IEEE Spectrum. [электронный ресурс] // URL: <https://spectrum.ieee.org/perplexity-ai> (дата обращения: 04.03.2024).

## СТЕГАНОГРАФИЯ В PNG-ФАЙЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КРИПТОГРАФИИ

ЛАТАНОВ К.В.<sup>1</sup>, БЛАГОВ М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГАУО СО «ФТЛ № 1»,

<sup>2</sup> СПбГУ

**Аннотация.** В статье рассматривается стеганосистема, использующая PNG-файл в качестве контейнера и текст в качестве передаваемого сообщения. Внедрение сообщения осуществляется при помощи метода LSB (Least Significant Bit), а дополнительная надежность при передаче сообщения обеспечивается средствами криптографии – шифрами Виженера, DES и «Кузнечик».

*Ключевые слова:* стеганография, криптография, LSB, шифр Виженера, шифр DES, шифр «Кузнечик»

### **Введение**

Стеганографические методы активно применяются для тайной передачи информации, так как с их помощью можно помещать скрытые данные в изображения, аудио или видео. При помощи этого остается тайной сама передача секретной информации, что делает их идеальным способом обходить системы мониторинга. Стеганография также обеспечивает защиту данных от перехвата, что делает ее очень важным инструментом для борьбы с современными угрозами информационной безопасности. Наличие криптографического шифра не всегда гарантирует защиту, а зашифрованное сообщение нередко выглядит неестественно и привлекает внимание. Поэтому совокупность средств и методов стеганографии и криптографии может обеспечить более надёжный канал коммуникации, который для прочтения сообщения необходимо не только взломать, но и обнаружить сам факт передачи [1].

### **Цифровая стеганография**

В данной статье будут рассматриваться методы цифровой стеганографии. Её суть заключается в помещении дополнительной информации в цифровые объекты. Цифровую стеганографию применяют для защиты информации от несанкционированного доступа, защиты интеллектуальной собственности, маскировки программного обеспечения и многого другого [2].

В качестве цифрового контейнера могут быть использованы изображения, аудио- и видеофайлы, но в данной работе мы рассмотрим цифровую стеганографию в изображениях в формате PNG [3]. Он является одним из самых гибких форматов изображений, который подходит для множества целей: разработки в области веб-графики, дизайн иконок и многое другое. Данный формат совмещает в себе хорошее качество изображений, поддерживает прозрачность альфа-канала и сжимает изображения без потерь [4].

### **Дополнительные меры защиты информации**

Дополнительная защита передаваемого сообщения достигается использованием одного из средств криптографии на выбор, а именно шифров Виженера, DES и «Кузнечик».

Шифр Виженера – метод шифрования алфавитного текста, основанный на буквах выбранного ключевого слова и являющийся формой полиалфавитной замены. Перед началом выполнения алгоритма выбирается используемый алфавит, отправляемое сообщение и секретный ключ. Последовательное добавление ключа до длины, равной длине исходного сообщения позволяет выполнять сложение порядковых номеров

символов алфавита и символов исходного текста. От этой суммы берется остаток по модулю, равному мощности выбранного алфавита, после чего в исходном алфавите ищется символ, имеющий порядковый номер, равный полученному результату. Этот символ и будет записан в шифrogramму. Обратный процесс выполняется в обратном порядке [5].

Шифр DES – метод симметричного блочного шифрования, основанный на генерации уникальных раундовых ключей на базе 56-битного мастер-ключа, который получается перед началом алгоритма. Сам алгоритм представляет собой 16 раундов, состоящих из следующих этапов: расширение, смешивание, замена и перестановка. На этапе расширения 32-битный блок увеличивается до 48 бит путем дублирования некоторых бит. После этого расширенный блок комбинируется с раундовым ключом путем применения операции побитного сложения. Далее происходит замена каждых шести бит четырьмя при помощи константных таблиц и перестановка замененных бит по определенному заранее правилу. Процесс расшифрования выполняется в обратном порядке [6].

Основу симметричного блочного шифра «Кузнечик» составляет подстановочно-перестановочная сеть (Substitution-Permutation network, далее — SP-сеть), которая является разновидностью сетей Фейстеля. При помощи SP-сети можно преобразовывать весь блок целиком, без разбиения на половины. Шифр на основе SP-сети получает на вход блок и ключ и совершает несколько чередующихся раундов, состоящих из стадий подстановки и стадий перестановки. В «Кузнечике» выполняется девять полных раундов, каждый из которых включает в себя три последовательные операции:

1. операция наложения итерационного ключа – это побитовый XOR ключа и входного блока данных
2. нелинейное преобразование представляет собой простую замену одного байта на другой в соответствии с таблицей
3. линейное преобразование: каждый байт из блока умножается в поле Галуа на один из коэффициентов ряда в зависимости от порядкового номера байта. Байты складываются между собой по модулю 2, и все 16 байт блока сдвигаются в сторону младшего разряда, а полученное число записывается на место считанного байта.

После девяти полных раундов следует последний, состоящий только из операции наложения итерационного ключа (K10). Все таблицы и ряды, необходимые для осуществления алгоритма шифрования «Кузнечик», представлены в разделе 4.1.1 ГОСТ Р 34.12-2015 [7].

#### **Метод наименее значимого бита.**

Существует множество методов, позволяющих скрывать информацию в растровых изображениях, но по отношению к PNG-файлам наиболее рационально применять метод наименее значимого бита (далее LSB, от англ. Least Significant Bit). Суть метода состоит в выделении последних бит картинки-контейнера с дальнейшей заменой на биты сообщения. Так как изменению подвергаются только наименее значимые биты, отличие изначального изображения-контейнера от изображения, содержащего секретную информацию, незначительно и обычно малозаметно для человеческого глаза.

Рассмотрим адаптацию метода LSB к стеганографии в PNG-изображениях. Секретную информацию мы будем шифровать в RGB-каналы каждого пикселя изображения. Для этого мы «разбираем» структуру файла, получаем из нее все нужные нам данные, а именно информацию об оттенках цвета каждого из пикселей в формате RGB. Затем

составляющие цвета необходимо перевести в двоичную систему счисления и заменить последние биты компонент цвета битами встраиваемого сообщения.

Данная операция не внесет в цвет заметных человеческому глазу искажений. Вместе с тем она поможет нам вложить ровно один байт нашего сообщения в каждый пиксель входного файла. Аналогичным образом выполняется и извлечение данных из контейнера. Чтобы получить сообщение, нужно, как и в первом случае, «разобрать» файл, получить цвета пикселей в формате RGB и прочитать необходимое количество последних бит каждого канала. Они и будут составлять один байт (или символ) скрытых данных. Прделав эти действия для всех других пикселей, мы получим полный текст секретного сообщения.

Чтобы понимать, сколько пикселей изображения необходимо прочитать, воспользуемся следующим приёмом: выберем место в изображении, в которое помещается служебная информация о шифруемом тексте, в оставшиеся пиксели изображения разместим сам текст. Извлечение информации из контейнера производится после анализа зашифрованной служебной информации. Далее получается информация о том, какому дополнительному шифрованию был подвергнут текст, и производится его окончательная дешифровка [8].

### **Заключение**

В ходе написания данной работы были изучены методы стеганографии. Также была рассмотрена область применения цифровой стеганографии. Изучен метод наименее значимого бита, его применение к файлам формата PNG. Также применены и реализованы такие криптографические алгоритмы, как шифр Виженера, DES и «Кузнечик» для дополнительной защиты передаваемой текстовой информации.

### **Список литературы**

1. Рябко, Б. Я. Основы современной криптографии и стеганографии. / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 232 с.
2. Грибунин, В.Г. Цифровая стеганография. / В.Г. Грибунин, И.В. Тцринцев, И.Н. Оков - М.: «Солон-пресс», 2020. - 262 с.
3. Стеганография в цифровых изображениях // URL: 3934-steganografiya-v-cifrovyh-izobrazheniyah.html (дата обращения: 15.04.2024).
4. PNG: особенности формата, преимущества и применение в компьютерной графике // URL: <https://nauchniestati.ru/spravka/png> (дата обращения: 10.03.2024)
5. Прядко К.Ш. Кодирование текстовой информации шифром Виженера // Материалы XXII Республиканской научной конференции студентов и аспирантов. Гомель: Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, 2019. С. 377-378.
6. Paar C., Pelzl J. Understanding Cryptography: A Textbook for Students and Practitioners. Springer, 2009. 390 p.
7. Криптографический алгоритм «Кузнечик» (ГОСТ Р 34.12-2015) // URL: <https://rekovalev.site/kuznechik-sturpto/#algorithm> (дата обращения: 30.03.2024).
8. Стеганографическая защита информации в файлах формата OFFICE OPEN XML с помощью цветовой модели RGB // URL: <https://journal.scsa.ge/ru/papers/steganograficheskaja-zashhita-informacii-v-fajlah-formata-office-open-xml-s-pomoshhju-cvetovoj-modeli-rgb/> (дата обращения: 17.04.2024)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЛИНИЙ ПЕТЕРБУРГСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

МОИСЕЕВ К.О., ТРОФИМОВА А.О.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Цель статьи – проанализировать текущий вид схемы метрополитена Санкт-Петербурга, историю ее изменения и несколько существующих в сети предложений по ее модернизации, и по результатам анализа с учетом выявленных преимуществ и недостатков примеров представить макет обновленной схемы.

*Ключевые слова:* схема, информационный стенд, дизайн, разработка макета, метрополитен Санкт-Петербурга.

В 2022 году дневной пассажиропоток метрополитена Санкт-Петербурга составлял 1,78 млн. человек. В каждом вагоне, на каждой из 72 станций располагаются таблички со схемой метро, чтобы любой человек, оказавшийся внутри, знал, как он может добраться до необходимой станции. Раз в несколько лет схема обновляет свой облик, однако изменения эти не значительны. С 2012 года на схеме появилось лишь несколько нововведений: добавились две ветки железнодорожных путей, обозначения для нескольких автовокзалов и двух маршрутов до аэропорта.

К рассмотрению в работе представлены три варианта реализации: текущая схема метрополитена (2024 год) [1]; схема, предложенная дизайнерами Ильей Бирманом, Егором Поповым и Сергеем Чикиным (2020 год) [2]; схема, предложенная студией Артемия Лебедева (2015 год) [3].

Все три примера в статье будут рассмотрены параллельно по выделенным структурным единицам. После анализа каждой из них станут видны все слабые и сильные стороны существующих решений, с учетом этого мы разработаем собственный дизайн схемы.

Первым пунктом в рассмотрении станет основа проекта – его фон и расположение основных элементов. Официальные представители пресс-службы метрополитена СПб считают, что на схеме должен быть минимум посторонних объектов, и текущий объем информации, расположенный на ней, является достаточным. Авторы двух других примеров считают иначе. На втором рассматриваемом макете добавлено несколько крупных рек и каналов островной части города (Мойка, Фонтанка, каналы Грибоедова и Обводный). Они подписаны на двух языках тем же цветом, которым выделены сами реки, и не мешают читаемости основного текста. Реки и каналы помогают ориентироваться в районах города, а также являются его символами и важными топологическими объектами. На третьей схеме они также нанесены, однако помимо водных артерий на фоне присутствует цветное выделение и подписи районов города, парков, достопримечательностей. Именно о таких вариантах реализации говорили в пресс-службе метрополитена. На наш взгляд, количество фоновых элементов на третьей схеме избыточно. Основные достопримечательности могут сделать ее более нарядной, интересной для гостей города, однако они не должны мешать основной цели схемы – ориентированию в метро.

После оформления фона, необходимо добавить сами ветки и станции метро. Для этого под фон мы накладываем карту города и отмечаем точками расположение станций.



Текущая схема Петербургского метрополитена совершенно не учитывает фактический масштаб карты города и расположение станций на ней. Разумеется, схема и карта – разные типы представления информации, однако при выборе оптимального пути для пассажира может иметь большое значение расположение станций относительно друг друга. Приведем пример, на нижней половине текущей схемы метрополитена соотношение расстояний между станциями, находящимися на одной горизонтали, можно определить как 4/3/2/1, когда в реальности это соотношение совершенно иное. Преимуществом текущей схемы является расположение конечных станций по вертикали. На третьей схеме нижние концы выровнены, что совершенно не соответствует реальному положению вестибюлей. По данному критерию нашему видению больше всего соответствует второе представление схемы. На нем линии повторяют изгибы города, и относительное расположение станций приближено к действительному.

Для визуального облегчения схемы линии в нашей реализации будут полыми. Полностью окрашенной останется та линия, на которой располагается макет. Поскольку сейчас на внутренней рекламе метрополитена цвет ветки соответствует цвету той, на которой посетитель видит плакат – можно сделать вывод, что существует возможность распределить разные схемы по разным поездкам и вестибюлям. Дополнительно на данном этапе нужно помнить о точках расширения схемы. Речь идет о создании новых станций метро и изменении статуса текущих, например, о закрытии на ремонтные или реставрационные работы.

Самым сложным из основных элементов схемы является станция с переходами. Все они расположены в центральной части города и требуют точности определения. На текущей схеме принадлежность названия вестибюля к определенной ветке определяется цветом текста. Такой вариант однозначно трактуется и не вызывает лишнего визуального шума, однако может быть доработан, например, цветовое выделение можно оставить только для одного из названий (на кириллице или на латинице). На второй и третьей схемах названия цветом не выделены, однако благодаря маленьким размерам кружков, обозначающих вестибюли, можно однозначно сопоставить их с подписями. На второй схеме для улучшения читаемости смежные станции оформлены углами с цветовой растяжкой. Это позволило дизайнеру получить больше пространства для подписи названий, однако большое расстояние между разными вестибюлями одной станции не соответствуют действительности. В этом плане третья схема выглядит более эстетично и правдоподобно.

Дополнительная оптимизация пространства на обеих схемах реализована в подписи станций Технологический институт и Площадь Александра Невского. Поскольку их названия на разных ветках отличаются только римской цифрой (I / II), нет необходимости писать их дважды. Такой метод сохранения и пространства, и ясности найдет применение в нашем проекте. Также на схемах отмечено, что станция Технологический институт имеет кросс-платформу. Мы считаем эту информацию избыточной, поскольку такой термин понятен только жителям Москвы и Санкт-Петербурга и не вносит дополнительной ясности.

Сами названия на второй и третьей схемах занимают меньше места по нескольким причинам. На официальном решении названия и на кириллице, и на латинице написаны полностью в верхнем регистре с достаточно жирной обводкой. Это делает текст крупным и четким, однако близкое расположение букв внутри слова и одинаковая яркость двух соседних названий может делать из надписей неразличимые черные пятна в условиях

движения поезда. На втором и третьем вариантах сделан явный акцент на кириллице. Названия в транскрипции заметно меньше и светлее. Дополнительно на второй схеме выделены конечные станции веток. Это не нарушает целостность оформления, однако может быть значимо, особенно для Спасской. В нашей реализации будут аналогичным образом расставлены акценты. В дополнение к вопросу об оформлении станций с переходами, выделение цветом названия в транскрипции будет определять принадлежность вестибюля к той или иной ветке.

Выбор шрифта – нетривиальная задача. В вагоне вокруг схемы висит множество разнообразной рекламы, проанализировав которую можно сделать вывод, что, в сравнении с текущим, шрифт с более тонким начертанием и увеличенным расстоянием между буквами, будет хорошо различим на схеме. Также шрифт должен быть строгим, без засечек, не имеющим авторство или лицензированным. Размер может регулироваться в процессе разработки макета в зависимости от его наполненности. Разумеется, перед выпуском полного тиража в печать необходимо протестировать экземпляр на читаемость и понятность в реальных условиях.

После нанесения основных элементов схемы нужно определиться с дополнительными транспортными узлами. На текущей схеме присутствуют обозначения для железнодорожных вокзалов, станций, платформ, остановочных пунктов, автовокзалов, автостанций, морских и речных вокзалов, пассажирских портов, аэропорта и автобусных маршрутов до него, железнодорожных маршрутов с тактовым движением поездов в часы пик. Последние добавили только в текущей версии схемы, ранее их не было. Из всего списка именно их мы считаем излишними, поскольку они занимают много места на схеме и при этом несут минимум информации. Если человек собирается выехать за город – на сайте РЖД он сможет найти с какого вокзала уходят поезда или электрички в нужном ему направлении. Попытку совместить две транспортные системы, которые слабо связаны между собой, считаем несостоятельной.

Условные обозначения на разрабатываемой схеме нами будут отрисованы самостоятельно, поскольку предложенные ранее варианты плохо различаются между собой, и чтобы понять значения картинок, необходимо обращаться к разделу с условными обозначениями. Перечень станций, к которым необходимо добавить условные обозначения ж/д платформ и станций остается неизменным. Основным портом города является «Пассажирский порт Санкт-Петербург» на Васильевском острове. Его можно считать как важным транспортным узлом, так и популярным культурным местом города. Считаем важной информацию об автобусном маршруте от ближайшей к нему станции метро – Василеостровской. Автобусные маршруты до пассажирского порта и аэропорта оформлены в едином стиле.

В завершении процесса разработки необходимо добавить область с пояснениями к условным обозначениям. На текущей схеме этот раздел оформлен крайне хаотично, отсутствует построение по модульной сетке. Также расположение в нижней части забирает ценное пространство схемы. На нашем макете, как и на оставшихся вариантах исполнения, блок с условными обозначениями расположен в правом верхнем углу вертикально. Это место оптимально по нескольким причинам. Во-первых, это пространство на схеме при любой конфигурации размеров будет свободно, соответственно при использовании текущих размеров рамки полезного пространства останется больше. Во-вторых, вертикальное расположение блока задает ему

последовательную структуру, в которой сразу можно найти нужную строку и прочитать обозначение.

Таким образом, поэтапно проанализировав каждое из трех представленных решений, мы выделили их сильные и слабые стороны. После внесения исправлений в слабые стороны и доработок в сильные, проект разработки схемы линий Петербургского метрополитена можно считать завершенным. На рис. 1 представлен вариант макета, расположенного на красной ветке метрополитена.



Рис 1. Разработанный макет схемы линий Петербургского метрополитена

### Список литературы

1. Схема линий Петербургского метрополитена 2024 [Электронный ресурс] URL: <https://metro.spb.ru/uploads/metromap2024.01.jpg> (дата обращения 21.04.2024)
2. Схема линий Петербургского метрополитена от Ильи Бирмана [Электронный ресурс] URL: <https://ilyabirman.ru/spb-metro/2020/> (дата обращения 21.04.2024)
3. Схема линий Петербургского метрополитена от Студии Артемия Лебедева [Электронный ресурс] URL: <https://www.artlebedev.ru/spb/metro-map/> (дата обращения 21.04.2024)

## БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО В МЕДИЦИНЕ

ТАРАСЕВИЧ О.А., НАЗАРЕНКО Н.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** Данная статья посвящена исследованию концепции "бережливого производства" и ее применению в медицинской отрасли. Бережливое производство в медицине представляет собой методологию улучшения качества и эффективности работы медицинских организаций путем оптимизации процессов, устранения излишеств и снижения издержек. В статье анализируются основные принципы бережливого подхода в медицинской сфере. Также рассматривается влияние бережливого производства на качество медицинского обслуживания пациентов, а также на работу медицинского персонала. Эта статья призвана пролить свет на значимость применения принципов бережливого производства в медицинской практике и стимулировать развитие эффективных стратегий управления в здравоохранении.

*Ключевые слова:* бережливое производство, бережливая медицина, качество, издержки, оптимизация процессов, управление, пациенты, медицинский персонал, здравоохранение, эффективность.

### Введение

В последние годы концепция бережливого производства, зародившаяся в автомобильной промышленности, находит все более широкое применение в сфере здравоохранения. Растущие затраты, ограниченные ресурсы и необходимость повышения качества и безопасности медицинской помощи побуждают медицинские учреждения искать пути оптимизации процессов и устранения потерь.

Бережливое производство (lean manufacturing) представляет собой философию менеджмента, направленную на создание максимальной ценности для потребителя при минимальных затратах. Основными принципами бережливого производства являются выявление и устранение любых видов потерь, вовлечение персонала в процесс непрерывного совершенствования, а также организация бесперебойного потока создания ценности.

Применение концепции бережливого производства в здравоохранении, известного как "бережливое здравоохранение" (lean healthcare), позволяет медицинским учреждениям повысить качество обслуживания пациентов, сократить время ожидания, уменьшить расходы и улучшить условия труда медицинского персонала. Внедрение бережливых методов и инструментов, таких как картирование потока создания ценности, система 5С, канбан и кайдзен, помогает оптимизировать клинические и административные процессы, устранить перегрузку персонала и избыточные операции.

В данной статье будут рассмотрены основные принципы и методы бережливого производства, адаптированные для сферы здравоохранения, а также успешные примеры их внедрения в медицинских учреждениях в городе Санкт-Петербург.

### **Зарождение проекта в России**

Министерством здравоохранения Российской Федерации совместно с государственной корпорацией «Росатом» осенью 2017 г. был запущен проект «Бережливая поликлиника», основная цель которого состоит в повышении эффективности деятельности лечебно-профилактических организаций и доступности медицинской помощи в стране.

Идея для проекта «Бережливая поликлиника» возникла благодаря принципам управления крупной компании «Тойота» и кайдзен-технологий бережливого производства. Компания «Тойота» не имеет прямого отношения к медицине, но методика управления ресурсами в лечебно-диагностическом процессе достаточно хорошо прижилась и в медицинской отрасли. [2]

Используя методы бережливого производства в медицинской сфере, можно увеличить объем выполняемой работы без привлечения сторонних трудовых ресурсов. Этот подход позволяет снизить стоимость медицинских услуг, улучшая уровень удовлетворенности пациентов и сокращая время, затраченное на получение услуги. Важным преимуществом является невысокие затраты на внедрение и использование технологии по сравнению с другими методами, а также независимость от дорогостоящих IT-решений. Оценка эффективности инвестиций показывает превышение показателя более чем на 20%.

Таким образом, бережливое производство в медицине – система, ориентированная на повышение общей удовлетворенности потребителей и исполнителей медицинских услуг, снижение трудопотерь специалистов медицинского учреждения, повышение эффективности процессов в учреждении и улучшение качества и производительности труда.

### **Цель проекта «Бережливая поликлиника»**

Исходя из анкетирования персонала «пилотных» медицинских организаций и граждан из числа прикрепленного населения, была сформулирована основная цель проекта: «Сократить время нахождения пациента в поликлинике, создать в ней особую атмосферу комфортности, желания приходить туда и заниматься собственным здоровьем, в том числе и для профилактики». [3]

### **Ключевые принципы реализации проекта «Бережливая поликлиника»**

Проект "Бережливая поликлиника" реализуется в наших реалиях для оптимизации работы медицинских учреждений, повышения качества обслуживания пациентов и снижения издержек. Эксперты, участвующие в процессе исполнения проекта, выделяют следующие ключевые принципы:

1. Направленность на пациента:
  - 1.1. Представление ключевых потребностей пациентов: анализ потока пациентов, выявление "узких мест" и причин недовольства.
  - 1.2. Сокращение времени ожидания: оптимизация процессов записи на прием, распределения потоков пациентов, организация работы регистратуры и врачебных кабинетов.
  - 1.3. Улучшение качества обслуживания: внедрение стандартов обслуживания, повышение квалификации персонала, создание комфортной атмосферы.
  - 1.4. Максимально возможное информирование пациентов: предоставление полной и доступной информации о предоставляемых услугах, порядке записи на прием, правилах поведения в поликлинике.

2. Совершенствование медицинского учреждения:
  - 2.1. Применение цикла PDCA (Plan-Do-Check-Act): планирование изменений, их внедрение, оценка результатов и корректировка действий.
  - 2.2. Использование инструментов бережливого производства: картирование потока создания ценности, 5S, канбан, кайдзен и другие методы для выявления и устранения потерь.
  - 2.3. Вовлечение персонала: создание корпоративной культуры, удержание мотивации персонала, поощрение инициативы и предложений по оптимизации работы.
3. Командная работа:
  - 3.1. Формирование проектной команды: включение представителей разных подразделений поликлиники (врачи, медсестры, административный персонал) для комплексного подхода к решению задач.
  - 3.2. Распределение ответственности: четкое определение ролей и обязанностей каждого члена команды.
  - 3.3. Эффективная коммуникация: регулярное проведение совещаний, обмен информацией и обратная связь.
4. Визуализация:
  - 4.1. Использование информационных стендов: размещение информации о порядке приема, расписании работы врачей, правилах поведения в поликлинике.
  - 4.2. Визуализация потоков пациентов: обозначение маршрутов движения пациентов, зон ожидания, кабинетов врачей.
  - 4.3. Применение системы 5S: сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация и совершенствование рабочего пространства.
5. Измерение результатов:
  - 5.1. Определение ключевых показателей эффективности (KPI): время ожидания приема, количество жалоб, удовлетворенность пациентов, эффективность использования ресурсов.
  - 5.2. Мониторинг и анализ KPI: отслеживание динамики показателей, выявление причин отклонений и принятие корректирующих мер.
  - 5.3. Оценка экономической эффективности проекта: расчет затрат на внедрение бережливого производства и полученных выгод.

### Результаты

Промежуточные результаты реализации свидетельствуют о наличии положительных изменений, среди которых: «сокращение времени получения льготных лекарств родственниками больных с 3 часов до 15 минут, сокращение перемещений медсестры в смену с 6,5 км до 900 м в смену, повышение результативности патронажа новорожденных медсестрой с 78% до 96%, повышение приема врачом пациентов точно вовремя с 54% до 84%».

Таблица 1

#### Результаты проекта

Показатель	Было	Стало	Результат
Сокращение времени ожидания и очереди у регистратуры	36 мин	9 мин	В 4 раза
Сокращение времени оформления записи на повторный прием к врачу	25 мин	5 мин	В 5 раз
Сокращение времени ожидания пациентом приема	96 мин	12 мин	В 8 раз

врача у кабинета			
Увеличение времени работы врача с непосредственно с пациентами	3 мин	6 мин	В 2 раза
Сокращение времени пребывания в поликлинике за счет сокращения обращений пациентов в регистратуру	108 мин	77 мин	В 1,4 раза
Сокращение времени звонка в регистратуру	12,6 мин	3 мин	В 4,2 раза

Данные по Санкт-Петербургу показывают, что к бережливому производству примкнули уже около трети медицинских организаций. В результате реализации проекта сократилось время ожидания пациентами приема у участкового врача-терапевта с 40 до 19 мин и в 3 раза уменьшилось время ожидания при обращении в регистратуру [1].

### **Заключение**

Таким образом, наблюдается значительное повышение доступности медицинской помощи, более рациональная организация рабочего пространства медицинского персонала. Пациенты имеют возможность предварительно записаться на прием к любому специалисту всеми доступными методами: с помощью электронной записи к врачу через сеть Интернет или в регистратуре.

### **Список литературы**

1. Метельская А. В., Камынина Н. Н. Развитие концепции «бережливой поликлиники». Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2020;28(спецвыпуск):785—790. DOI: <http://dx.doi.org/10.32687/0869-866X-2020-28-s1-785-790>.
2. Вумек Дж. В88 Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Джеймс Вумек, Дэниел Джонс ; Пер. с англ. — 7-е изд. — М.: Альпина Паблишер, 2013. — 472 с.
3. Уйба В.В., Забелин М.В., Миронова В.В., Касимова О.А., Кретов А.С. Технологии бережливого производства в здравоохранении (опыт ФМБА России). Медицина экстремальных ситуаций. 2018; 20(3): 248-252.
4. Бережливое производство. Основные положения и словарь ГОСТ Р 56020 –2014, Москва Стандартинформ 2014 2. Тэппинг Д., Данн Энн Бережливый офис; Пер. с англ. – М. Альпина Бизнес Букс, 2009г. -322с. – (Серия «Модели менеджмента ведущих корпораций»)
5. Эффективное государственное и муниципальное управление как фактор социальноэкономического развития России. Ивлева Г.Ю., ред.
6. Презентация Рота Стефана (Roth Stefan) «Makigami Vorgangsbeschreibung».
7. Особенности применения концепции «Бережливое производство» в компаниях различных сфер деятельности и национальностях (различных странах) К.О. Сафронова, преподаватель кафедры общего и стратегического менеджмента, Научный исследовательский университет Высшая школа экономики (Нижний Новгород).

## **ОТРАВЛЯЮЩИЕ АТАКИ НА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**ЧЕПАСОВ Д.В., ЩЕДРИН А.А.**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В работе представлены результаты влияния на работу и точность предсказаний отравляющих атак на простейшие архитектуры сверточных нейронных сетей, а также проведены испытания защиты против этих атак.

*Ключевые слова: Сверточная нейронная сеть, Искусственный интеллект, Отравляющие атаки, Компьютерное зрение, Бэждор атаки, YOLO*

## **Введение**

За последние десятилетия, алгоритмы и модели машинного обучения стали неотъемлемой частью производственной, коммерческой, общественной и научных отраслей деятельности. Кроме того, с каждым годом степень вовлеченности искусственного интеллекта во все сферы деятельности только возрастает. Соответственно, вопросы безопасности интеллектуальных систем, основанных на моделях машинного и глубокого обучения, становится актуальной как никогда. Даже самые простые атаки на модели могут привести к потере важных данных, нанести серьезный экономический, социальный и даже физический ущерб.

В данной работе мы рассматриваем некоторые атаки на архитектуры сверточных нейронных сетей CNN (Convolutional Neural Network). Данные архитектуры до сих пор актуальны в задачах компьютерного зрения, в частности в различных системах распознавания лиц и сущностей. Актуально не позволить злоумышленнику обойти или повредить подобную систему. На текущий момент известны как технические способы атаковать подобную систему, так методы, основанные на использовании специальных приспособлений. Это является существенной проблемой, так как имея необычные очки или специализированную маску, можно обмануть сложную архитектуру свёрточной нейронной сети, как показано в [5]. Или в задаче детекции можно с помощью атак уменьшить точность YOLO ([6]). Даже немногочисленные примеры показывают, насколько необходимо заботиться о защите модели, так как несложные методы атаки способны сломать работу сложной и новой архитектуры нейросети. Это также очень актуальная тема для LLM моделей ([7]), однако защита таких моделей в нашей работе не рассматривается.

Существует различные типы атак на модели: причинные и исследовательские. Первые меняют работу модели так, как хочет того злоумышленник, тогда как вторые служат для получения закрытой информации о модели. Нас будет интересовать только первый тип атак. Кроме того, нам наиболее интересна ситуация, когда злоумышленник может *отравить* датасет, даже имея доступ к малой его части, тем самым изменяя работу модели, без непосредственного доступа к ее архитектуре и весам. Подобный тип атак весьма эффективен и его достаточно сложно отследить. Поэтому проблему защиты нейронных сетей нужно развивать, изучая методы атаки и защиты, а также тестируя их на различных архитектурах нейронных сетей.

В работе рассматриваются следующие типы атак на сверточные сети: Trojan и BadNet. Мы оценим их отрицательное влияние на работу нейронной сети, на качество классификации при тестировании чистого набора данных и “отравленного” датасета. Кроме того, мы обсудим и применим некоторые методы защиты от подобных атак.

## **Принципы работы атак**

**Trojan attack.** К изображению добавляется незаметный триггер, который заставляет неправильно распознавать входящую картинку. Триггер задевает небольшое количество входных нейронов сети. Внутри маски каждый пиксель подбирается так, чтобы максимизировать на черном фоне вероятность нужной классификации. Пиксели легко подобрать, зная веса. Если не известны веса нейросети, используется реверс инженеринг. Например, это может быть небольшое лого, или аудио-фрагмент.

**BadNet.** Будем рассматривать такой сценарий: пользователь отдаёт в облако на дообучение модели. В нем атакующий выбирает метку-жертву. Далее добавляет к данным



этой метке триггер. Т.е. добавляем триггер, например, квадратик небольшого размера в правый нижний угол для пятерки, и когда мы вводим изображение, с любой меткой, но с таким же триггером, модель неправильно классифицирует. Цель – вкинуть такие данные, чтобы не ухудшить точность распознавания, но модель реагировала бы на бэкдор триггер

Пользователь указывает гиперпараметры, описывает задачу, а потом перепроверяет модель на точность. Такая атака возможна в коллаборативном обучении, когда несколько пользователей собирают вместе свои данные и модели в облаке, каждая обучается на всех.

### Принципы защиты против атак

Опишем способ защиты. Он очень интуитивен, так как мы отравляем датасет небольшим количеством зараженных меток, не выбирая конкретную, пытаюсь так создать “иммунитет” к отравляющему входу, он интуитивен, так как эта схема похожа на приспособление организма человека против вируса после введения вакцины.

Также можно посмотреть на это с другой стороны, мы надеемся что нейросеть «запомнив» данный триггер на всех отравленных метках привыкнет к ситуации, когда у нас есть число с таким шаблоном, и будет его классифицировать правильно. Т.е. есть два случая, что, например, картинка рукописного числа у нас имеет, как и чистые экземпляры, так и зараженные, то применив данный метод защиты мы надеемся, что нейросеть запомнит их оба, и не будет реагировать на входящее отравленное изображение.

Он очень похож на метод пропатчивания модели, описанный в [3], однако с теми различиями, что мы дополнительно не обучаем модель на картинках, с наложенным реверс-триггером, найденного с помощью техники данной статьи([3]).

Такой метод может быть полезен, если защитник нейросети знает о том, какие триггеры будут использованы, поэтому метод предложенный в [3] более универсальный.

### Эксперименты

Для проведения эксперимента была реализована простая сверточная нейронная сеть с оптимизатором Adam. Из-за отсутствия больших вычислительных мощностей был выбран датасет MNIST, в котором необходимо распознать рукописные числа.

С начала проведем Trojan Attack. Наша цель заключается в том, чтобы рукописная цифра три была классифицирована как пятерка. При проверке, точность была более 97%. Отравив тройку, которая всегда точно предсказывалась, и отправив её на вход, мы можем заметить, что вероятность классификации пятерки при вводе зараженной тройки увеличилась в 5 раз. Однако, так как она была очень маленькой, то такой же и осталась, но данный триггер повышает вероятность неправильной классификации, следовательно работает. В этом опыте использовалась обычная полносвязная нейронная сеть.

Далее проведем еще несколько тестов, на следующей простой архитектуре CNN (см. рис. 1).

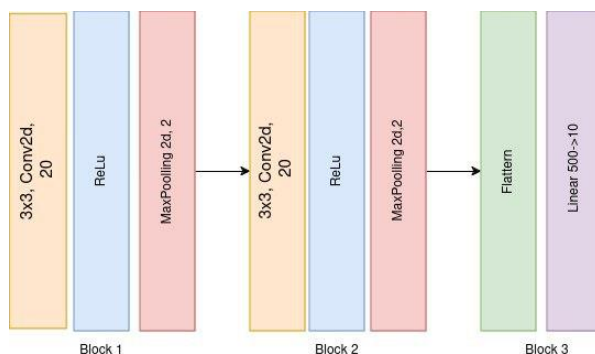


Рис 1. Архитектура CNN

В этой нейросети мы проводим ряд обучений, в котором мы отравляем датасет на 100, 1000 и 2000 картинок без изменения меток. Было проведено исследование изменения точности и loss во время обучения нейросети на различном количестве отравленных картинок. Сильного отличия работы нет, а результат остается таким же качественным на чистом входе.

Далее создаем отравленные датасеты и сравниваем с чистым. Мы берем такую схему атаки: делаем так, чтобы единица и шестерка была равна девяти при триггере. Результаты атаки видно ниже, при этом отравим небольшую часть единиц и пятерок в самой CNN. Суть отравления состоит в том, что мы добавляем шаблон триггера (3 небольших квадратика) в правый нижний угол, не затрагивая тем самым важные часть изображения.

Таблица 2

Входящая Цифра	Чистый вход			Зараженный вход			Пропаченная нейросеть при зараженном входе		
	Precision	Recall	F1-score	Precision	Recall	F1-score	Precision	Recall	F1-score
-									
0	0.97	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99
1	0.97	0.98	0.98	0.97	0.47	0.63	0.97	0.48	0.64
2	0.98	0.95	0.96	0.98	0.95	0.96	0.46	0.96	0.62
3	0.96	0.98	0.97	0.97	0.98	0.97	0.97	0.99	0.98
4	0.99	0.96	0.98	0.99	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98
5	0.98	0.95	0.97	0.98	0.45	0.61	0.96	0.46	0.62
6	0.98	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
7	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
8	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.99	0.95	0.97
9	0.95	0.95	0.95	0.47	0.96	0.63	0.94	0.98	0.96
Accuracy	0.97			0.87			0.87		

Мы можем увидеть, что точность классификации, значение других метрик остается на хорошем уровне. Однако попробуем применить зараженный вход. Можно заметить, что зараженные метки сильно упали в качестве прогнозирования, когда общая точность не сильно изменилась, поэтому можно сделать вывод, что атака работает успешно. И далее протестируем на нейросети, которая была обучена на 1000 зараженных меток. Точные табличные значения показаны в таблице 1.

На рисунках ниже, показана работа современной YOLO 8, с отравленным датасетом и чистым. Суть отравления состояла в создании триггера BadNet(маленького белого квадрата) возле каждого игрока. Можно заметить, что модель перестает обнаруживать любых игроков на поле. Из этого можно заключить, что даже простейшие атаки способны заставить модель перестать выполнять свою задачу.



Рис.2. Чистая YOLO



Рис. 3. Отравленная YOLO

## Заключение

Были рассмотрены разные типы атак и защита против них. Также на практике было показано насколько данная защита эффективна против того или иного типа атаки. Из экспериментов, можно заключить, что при небольшом отравлении входа точность отравленных меток падает. Даже при небольших усилиях и малом проценте отравления данных можно сломать современную модель YOLO 8, что подтверждает о необходимости построения алгоритмов защиты против атак для нейросетей.

## Список литературы.

1. Tianyu Gu, Brendan Dolan-Gavitt, Siddharth Garg. BadNets: Identifying Vulnerabilities in the Machine Learning Model Supply Chain.
2. Yingqi Liu, Shiqing Ma, Yousra Aafer, Wen-Chuan Lee, Juan Zhai, Weihang Wang, Xiangyu Zhang. Trojaning Attack on Neural Networks.
3. Bolun Wang, Yuanshun Yao, Shawn Shan, Huiying Li, Bimal Viswanath, Haitao Zheng, Ben Y. Zhao. Neural Cleanse: Identifying and Mitigating Backdoor Attacks in Neural Networks.
4. Kang Liu, Brendan Dolan-Gavitt, and Siddharth Garg. Fine-Pruning: Defending Against Backdooring Attacks on Deep Neural Networks.
5. Alon Zolfi, Shai Avidan, Yuval Elovici and Asaf Shabtai. Adversarial Mask: Real World Universal Adversarial Attack on Face Recognition Models.
6. Jung Im Choi and Qing Tian. Adversarial Attack and Defense of YOLO Detectors in Autonomous Driving Scenarios.
7. Yuanwei Wu, Xiang Li, Yixin Liu, Pan Zhou, Lichao Sun. Jung Im Choi and Qing Tian. Jailbreaking GPT-4V via Self-Adversarial Attacks with System Prompts.

## МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВНИМАНИЯ У ВОДИТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПОД УПРАВЛЕНИЕМ АВТОПИЛОТА

ШАТОВ М.С., МАНСУРОВ В.А., ГАЛКИНА Т.В.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В статье рассматривается актуальная проблема поддержания концентрации внимания водителей, использующих системы автопилота. Анализируются различные методы контроля и поддержки внимания, включая как технологические, так и психологические подходы. Особое

внимание уделяется важности мониторинга состояния водителя для предотвращения дорожно-транспортных происшествий и обеспечения безопасности на дорогах. Приводится обзор существующих систем мониторинга и предлагаются новые подходы, направленные на повышение мотивации водителей к соблюдению высокой степени концентрации внимания.

*Ключевые слова: автопилот, системы мониторинга водителя, поддержание концентрации, безопасность на дороге, технологические методы, психологические методы, рейтинговая система.*

Автопилот представляет собой автоматизированную систему, разработанную для обеспечения повышенной безопасности на дорогах и личного комфорта пользователей. Данная система включает в себя множество функций, с помощью которых может распознавать условия вождения и помогать выполнять различные действия, например, удерживать машину в полосе движения, контролировать скорость, осуществлять маневры перестроения, поворота и т.д.

В свою очередь системы автопилотирования могут иметь разные уровни автоматизации и вовлеченности пользователя в процесс. Начиная с нулевого уровня, в котором может присутствовать круиз-контроль, но не более, заканчивая пятым – системой, в которой место для водителя даже не предусмотрено.

Большинство компаний стремились к разработке автопилотов четвертого и пятого уровней и сосредоточивали свои усилия на создании систем с минимальным участием человека. В связи с чем компании считали, что их продукция не нуждается в системах отслеживания состояния водителей, из-за чего данному аспекту не уделялось достаточное внимание. Обычно все ограничивалось обсуждением передачи обязанностей между человеком и автомобилем. Соответственно, считалось, что можно пропустить этап разработки оборудования какого-либо отслеживания для третьего уровня автономности и переходить сразу к четвертому.

Однако из-за увеличения числа дорожных аварий и растущей озабоченности по поводу безопасности людей, все больше и больше внимание привлекают системы мониторинга поведения водителей во время движения. Ведь это играет ключевую роль в безопасности движения, а с увеличением количества автомобилей и заторов на дорогах, автомобильная промышленность и регулирующие органы осознали важность внедрения превентивных мер. Эти меры направлены на снижение рисков, связанных с человеческим фактором, который часто является основной причиной аварий [1].

Первое, что приходит на ум, когда речь заходит о каком-либо отслеживании человеческого поведения во время движения – это система мониторинга взгляда водителя. DMS является такой системой трекинга взгляда, которая следит за тем, чтобы водитель не засыпал и не отвлекался во время вождения автомобиля. Наличие таких систем в скором времени может стать обязательным во всех выпускаемых в Европе и Северной Америке автомобилях.

При этом отслеживание взгляда – это минимальное требование, чтобы заниматься отслеживанием состояния водителя, и оно должно работать исключительно хорошо. Отсутствие качественного отслеживания головы, лица и глаз влечет за собой недостаток данных для обработки, которых для работы системы требуется собрать огромное количество.

Однако именно из-за того, что система помогла сократить число аварий на 40% и таким образом зарекомендовала себя, все большее число компаний стремятся внедрить ее в свои продукты. По данным [1] с каждым годом рост рынка систем мониторинга будет составлять 11%, таким образом к 2030 году их будет уже в два раза больше.

Рассмотрим, что из себя представляют такие системы. Они умеют распознавать человека, севшего за руль, и персонально настраивать характеристики автомобиля. Такое распознавание помогает обеспечить факт наличия у водителя прав владения техникой.

Повороты головы, направление взгляда – основные признаки водителя, по которым можно определить степень сконцентрированности на дороге. Частые озирания по сторонам сигнализируют о рассеянности внимания, медленные моргания и частая зевота, в свою очередь, говорят о накопившейся усталости [2].

Система также способна обнаруживать отвлекающие факторы во время поездки. Все такие моменты, как употребление пищи, разговоры по телефону, курение, в обязательном порядке будут зафиксированы. Ровно также как и состояние здоровья. Достаточно просто определить температуру тела человека и исключить его поездку, предотвратив тем самым возможность возникновения опасной ситуации [3].

Разберемся теперь с тем, каким образом информировать водителя о снижении концентрации и обсудим способы ее поддержания. Основная задача данных систем заключается в том, чтобы не допустить снижение концентрации внимания пользователя и потери контроля дорожной ситуации.

Существует несколько способов поддержания внимания водителя на дороге, разобьем их на группы. Первая группа — это технологические методы, такие как уведомления, громкие звуки и вибрации руля и сидений. Они включают в себя различные технические устройства и системы, которые напрямую воздействуют на внимание водителя через сенсорные, тактильные и визуальные сигналы.

Ключевой аспект в уведомлении водителей о нарушениях или потенциальных опасностях во время вождения — это сохранение их внимания на дороге. Для обеспечения безопасности крайне важно использовать эффективные и ненавязчивые методы коммуникации [4]. Например, графические уведомления могут отображаться на приборной панели или ветровом стекле через проекционный дисплей. Система может использовать аудиосигналы, чтобы передать информацию ясно и быстро, без необходимости отвлекаться на текстовые дисплеи. При этом она может адаптироваться под особенности пользователя. Если водитель не обращает внимания на предупреждения, то система должна постепенно увеличивать их интенсивность. В крайнем случае она может подключить вибрационные сигналы руля и сидений, что может быть полезно для слабослышащих водителей.

Важно отметить, что использование мерцания подсветки вокруг стекла или ярких вспышек для повышения концентрации недопустимо. Это может на короткое время ослепить водителя и привести к потере им контроля над дорожной ситуацией. Технические средства нужно использовать комбинированно, в некоторых случаях может быть достаточно текстовых уведомлений, а в других случаях нужно использование всех устройств одновременно. Системы уведомления пользователя о снижении концентрации должны быть способны гибко подстраиваться под ситуацию, обеспечивая доставку критически важной информации, не отвлекая при этом водителя от дороги.

Рассмотрим другую группу способов поддержания концентрации внимания водителя на дороге – психологические методы. В этой группе сосредоточены методы, которые воздействуют на внутреннее состояние и мотивацию водителя следить за дорожной ситуацией. Ключевым элементом здесь является формирование у водителя осознания возможных последствий невнимательности за рулем.

Если пользователь никак не реагирует на предупреждения или получает их слишком много, то автомобиль отключает автопилот и ограничивает его использование на данную поездку. Данное ограничение обходится перезапуском маршрута следования. В случае многократного получения ограничений на использование автопилота, пользователю выдается запрет на его активацию на одну неделю [5].

В данном случае мы рекомендуем накладывать ограничение не на конкретную поездку, а на период в несколько часов, обойти который не представляется возможным, что позволит пользователю осознать свой проступок и в последующем быть более внимательным за рулем. Однако этот подход имеет свои недостатки. Он только наказывает за нарушение правил, но не поощряет тех водителей, которые всегда сосредоточены на дороге.

Мы предлагаем совершенно новый подход — внедрение рейтинговой системы, которая будет активизироваться при использовании автопилота. Если вы смотрите на дорогу и не отвлекаетесь, ваш рейтинг будет расти. Однако, если вы игнорируете требования системы и не контролируете управление автомобилем, система сделает вывод, что ваше внимание ослабло, и ваш рейтинг снизится. Если рейтинг водителя опустится ниже определенного уровня, автопилот будет заблокирован. Чтобы разблокировать его, вам нужно повысить свой рейтинг до минимально допустимого уровня. Для этого нужно проехать определенный участок пути без использования автопилота, внимательно следя за дорогой и сохраняя контроль над автомобилем.

Предлагается не использовать бесконечный рейтинг. Если не ограничить количество баллов, которые могут заработать пользователи, они будут накапливать их в большом количестве. В таком случае штрафные санкции потеряют свой смысл, поскольку водители не будут ощущать уменьшения баллов и, соответственно, не будут чувствовать ответственности за свои действия. Вместо этого мы предлагаем ввести ограниченный рейтинг с установленными рамками. Это будет стимулировать пользователей поддерживать высокий рейтинг и позволит водителям сразу видеть и чувствовать последствия своих нарушений [6].

Для эффективного поддержания концентрации водителя на дороге необходим комплексный подход, включающий как технологические, так и психологические методы. Внедрение рейтинговой системы может стать эффективным способом мотивировать водителей соблюдать правила и поддерживать высокую концентрацию внимания на дороге. Это может существенно повысить безопасность дорожного движения и снизить количество аварийных ситуаций.

### Список литературы

1. Объем рынка систем мониторинга автомобильных водителей в 2024-2030 гг.: сайт. – URL: <https://exactitudeconsultancy.com/ru/отчеты/36444/Рынок-систем-мониторинга-автомобильных-водителей/> (дата обращения: 01.05.2024)
2. Иванов К.А., Камардина Н.В., Данилов И.К., Коноплев В.Н. Метод биоконтроля усталости водителя транспортного средства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 217–224. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-217-224
3. Малютина Анна Алексеевна, Система мониторинга состояния водителя автотранспорта // Наука без границ. 2018. №6 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-monitoringa-sostoyaniya-voditelya-avtotransporta> (дата обращения: 01.05.2024)
4. Функциональные состояния оператора: влияние и методы поддержания работоспособности // Научные Статьи.Ру — портал для студентов и аспирантов. — Дата последнего обновления статьи: 07.03.2024. — URL <https://nauchniestati.ru/spravka/funkczionalnye-sostoyaniya-i-rabotosposobnost-operatora/> (дата обращения: 01.05.2024)

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 - 17(18) мая 2024

5. Руководство пользователя модели 3: сайт. – URL: [https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en\\_us/GUID-20F2262F-CDF6-408E-A752-2AD9B0CC2FD6.html](https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/GUID-20F2262F-CDF6-408E-A752-2AD9B0CC2FD6.html) (дата обращения: 01.05.2024)

6. Есиркепова И.Е. Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3 (часть 3) – С. 355-357

## ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

ШИРЯЕВ Н.А.

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
В.И.Ульянова (Ленина)*

**Аннотация.** В современном мире все больше и больше компаний сталкиваются с необходимостью анализировать большие объёмы данных для выявления аномалий и предотвращения негативных последствий. Прогнозирование аномалий в многомерных рядах является одним из наиболее важных задач в области анализа данных и машинного обучения. В данной работе рассматриваются различные методы и подходы к прогнозированию аномалий в многомерных рядах и представляется методика оценки различных алгоритмов. Данная работа имеет большое практическое значение для компаний и организаций, стремящихся снизить риски и улучшить качество своей деятельности.

*Ключевые слова:* метод оценки Libra, метод Arima, CNN (Convolutional neural network), LSTM, DASNet, HAI, SWaT

### Введение

Раннее предсказание в потоковых данных имеет практическое и значимое применение во многих отраслях. Оно уже применяется для предсказания финансовых рынков, предсказания состояний пациентов в медицинских учреждениях, предсказания аварийных ситуаций на промышленных объектах и т.д.

Основная цель данной работы заключается в оценке эффективности прогнозирования для многомерных временных рядов с использованием трёх различных методов. В статье предлагается комплексная методика оценки эффективности алгоритмов прогнозирования, которая включает не только оценку точности прогноза, но и сложность прогнозной модели, её ресурсоемкость и т.д. Для её демонстрации в статье представлен анализ нескольких моделей, а именно алгоритм Multivariant ARIMA, который является классическим алгоритмом прогнозирования временных рядов, LSTM - рекуррентную модель и модель DSANet, которая представляет собой комбинацию из двух параллельных свёрточных компонента, авторегрессии и модулей самовнимания(кодеров и декодеров) для моделирования сложных глобальных и локальных временных паттернов.

### Описание методики тестирования

В основу предложенной методики лёг подход, предложенный в [1], разработанный для оценки эффективности алгоритмов выявления аномалий. Ключевыми элементами предложенного фреймворка NAB являются размеченные данные и система оценок эффективности. В [2] предложен подход для оценки эффективности методов прогнозирования временных рядов, его отличительной особенностью является автоматическая оценка и ранжирование алгоритмов в зависимости от их эффективности. Однако рассчитываемые в [2] метрики не учитывают вычислительную эффективность

модели, что также является не маловажным фактором при выборе алгоритма, особенно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Разработанная методика состоит из следующих этапов:

1. Выбора обучающих данных из существующих в базе данных.
2. Выбора одного из реализованных методов прогнозирования.
3. Выбора окна прогноза для обученной модели

Введём пояснительные определения для долгосрочного и краткосрочного прогнозов, а также окна прогноза:

Окно прогноза - временной интервал (количество шагов), на которые нейронная сеть предсказывает будущие значения на основе данных, которые она уже обучилась

Краткосрочный прогноз - это предсказание будущих значений, основанное на анализе поступающих алгоритму входных данных, с временным периодом предсказания менее 10% от временного диапазона входных данных.

Долгосрочный прогноз данных - это предсказание будущих значений, основанное на анализе поступающих алгоритму входных данных, с временным периодом предсказания более 10% от временного диапазона входных данных.

Функционирование системы можно описать следующим образом.

Для каждого временного ряда программа разбивает исходные данные на обучающую, валидационную и тестовую выборку. Разделение зависит от окна прогноза и размера батча. В связи с тем, что разбиение на батчи приводит к формированию трехмерных данных, реализуемые алгоритмы поддерживать работу с ними. Затем обучающий временной ряд передается методу прогнозирования. Вычислив будущие значения, они передаются обратно в эталонный тест для вычисления различных показателей точности прогнозирования. На выходе эталонный тест создаёт отчёт, содержащий подробный обзор и ранжирование по сравнению с современными методами и записывает это в базу данных.

Отчёт показывает тип модели, название обучающих данных, среднюю абсолютную ошибку, симметричную среднюю абсолютную процентную ошибку и среднюю абсолютную масштабированную ошибку и размер прогноза. Рисунок 1 иллюстрирует схему работы процесса:

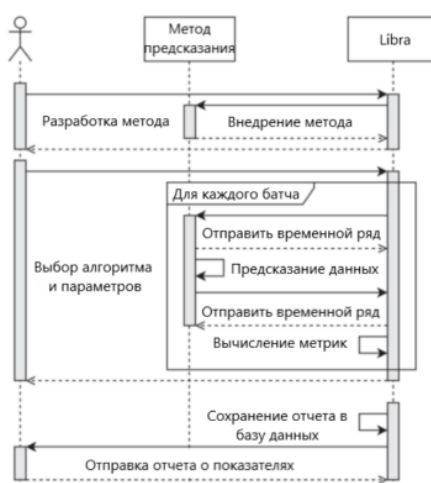


Рис. 1 - схема работы



### Расчёт метрик

Также введём формулы метрик, которые используются при выводе отчёта Libra: средняя абсолютная ошибка(MAE), симметричная средняя абсолютная процентная ошибка(SMAPE) и средняя абсолютная масштабированная ошибка(MAPE).

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |y_{t \text{ predicted}} - y_{t \text{ true}}|}{n},$$

$$SMAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|y_{t \text{ predicted}} - y_{t \text{ true}}|}{(|y_{t \text{ true}}| + |y_{t \text{ predicted}}|)/2},$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_{t \text{ true}} - y_{t \text{ predicted}}}{y_{t \text{ true}}} \right|,$$

где  $y_{t \text{ predicted}}$  - предсказанные алгоритмом значения,  $y_{t \text{ true}}$  - истинные будущие значения,  $n$  - окно прогноза.

### Программная реализация методики

Для системной работы алгоритмов и централизации данных, была создана база данных при помощи системы pgAdmin на языке PostgreSQL. Для каждого отдельного датасета создается своя база данных с тремя таблицами. Обязательным условием является загрузка файлов с названиями, имеющими постфикс train, validation, test соответственно.

Методика целиком написана на языке Python. Обращение к базе данных реализовано при помощи библиотеки rusorg2.

Как отмечалось ранее, система выводит отчёт из данных метрик на каждом временном этапе прогноза. Так как напрямую сравнить все 3 алгоритма по сложности невозможно по определению: нейронные сети определяются количеством обучаемых параметров, а математическая модель Arima количеством корней в полиноме, который в данной системе определяется количеством временным размером обучающих данных. В связи с этим в базу данных записывается среднее значение метрик.

### Сравнительная оценка методов предсказания

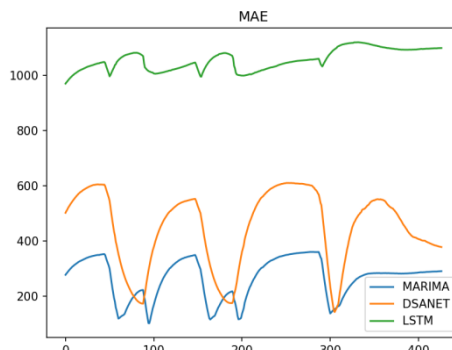


Рис. 2 - График метрики MAE для каждого этапа прогноза

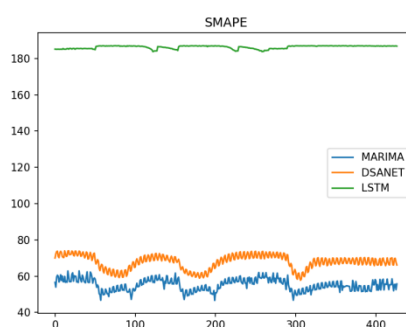


Рис. 3 - График метрики SMAPE для каждого этапа прогноза

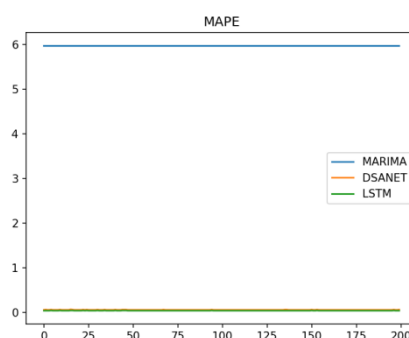


Рис. 4 - График метрики MAPE для каждого этапа прогноза

По данным результатам можно увидеть, что не смотря на большее расхождение значений DSANet и LSTM в средней абсолютной ошибке, которая больше всего зависит от диапазона самих анализируемых данных, средняя абсолютная масштабированная ошибка, которая показывает процентное сходство предсказанных и истинных значений, лучшая именно у них.

В качестве вывода можно сказать, что при помощи данной системы можно получить удобный отчёт оценки объективных метрик точности моделей предсказания, благодаря чему возможно адекватно оценить эффективность данных моделей.

### Список литературы

1. A. Lavin and S. Ahmad, "Evaluating Real-time Anomaly Detection Algorithms – the Numenta Anomaly Benchmark," in 14th International Conference on Machine Learning and Applications (IEEE ICMLA'15), 2015.
2. André Bauer, Marwin Züfle, Simon Eismann, Johannes Grohmann, Nikolas Herbst, Samuel Kounev. Libra: A Benchmark for Time Series Forecasting Methods, 2021
3. Кизбикенов К. О. Прогнозирование и временные ряды – Барнаул : АлтГПУ, 2017
4. Wenhao Wu, Yuxiang Zhao, Yanwu Xu, Xiao Tan, Dongliang He, Zhikang Zou, Jin Ye, Yingying Li, Mingde Yao, Zichao Dong, Yifeng Shi. DSANet: Dynamic Segment Aggregation Network for Video-Level Representation Learning, 2021
5. Ехлаков Р.С., Судаков В.А.: Прогнозирование стоимости котировок при помощи LSTM и GRU сетей. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 17. 13 с.

ННБ XII, Санкт-Петербург, 16 - 17(18) мая 2024

Сборник материалов  
XII Научно-практической конференции с международным участием  
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»  
для студентов, аспирантов и молодых ученых  
состоявшейся 16-18 мая 2024 г.  
в г.Санкт-Петербурге  
Том II