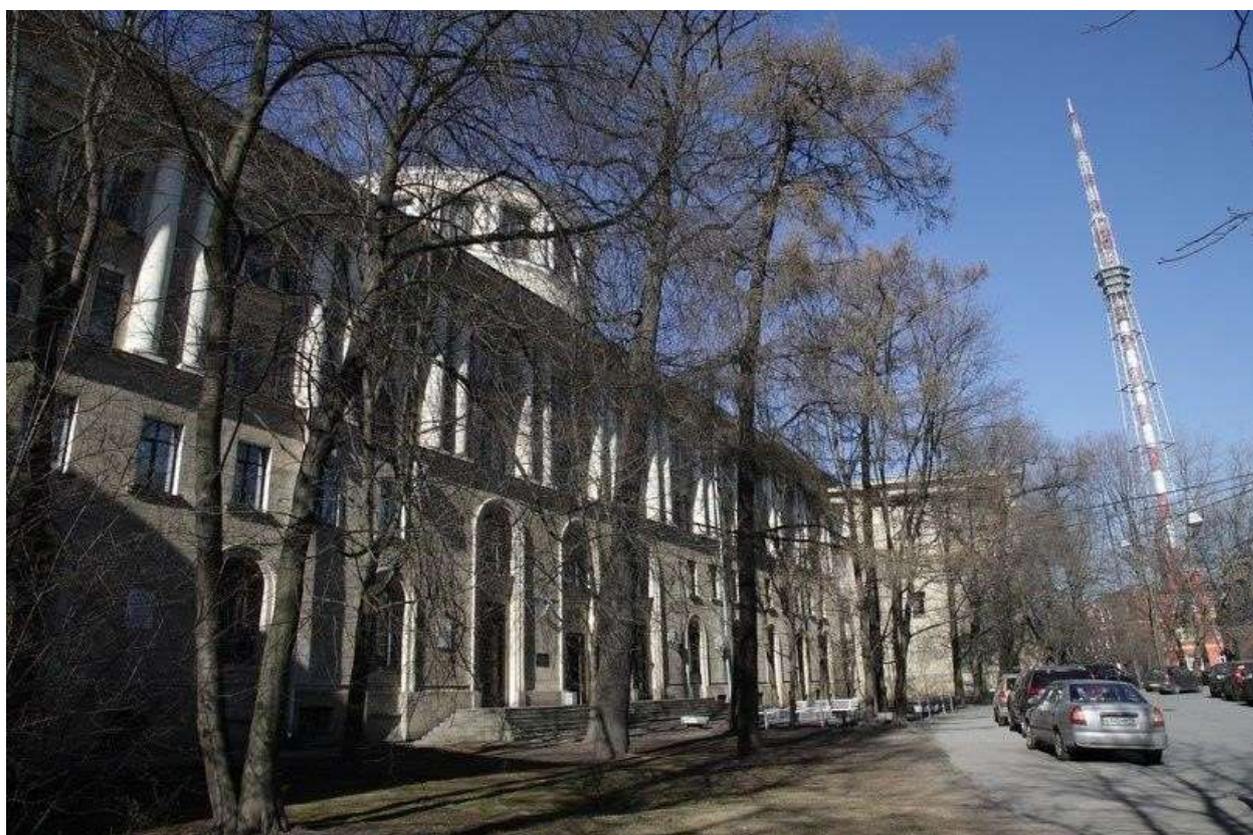


Министерство образования и науки РФ  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

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



**Сборник материалов конференции  
19 – 21 мая 2022**

Том I

Санкт-Петербург  
2022

**УДК 001.2**

**X 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», 2022. 246 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**

- *Биотехнические системы и технологии*
- *Приборостроение*
- *Техносферная безопасность*
- *Электропривод, автоматика и энергосбережение*
- *Мехатроника и робототехника*
- *Лингвистика*
- *Информатика и управление в технических системах и ВТ*
- *Системный анализ и информационная безопасность*
- *Прикладная математика и программная инженерия*
- *Алгоритмическая математика*
- *Искусственный интеллект в прикладных областях*
- *Электроника, нанотехнологии, наноматериалы*
- *Технологическое предпринимательство: от проектного замысла к рыночному позиционированию*
- *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*

Сборник материалов содержит доклады, представленные на X Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых, состоявшейся 19 – 21 мая 2022 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.

**Научно-практическая конференция проведена при финансовой поддержке  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ».**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ .....</b>	<b>8</b>
В.А. Мошников АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДИЗАЙН И ИЕРАРХИЧЕСКИЕ НАНОСТРУКТУРЫ (R@D-МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА «НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА»).....	8
<b>СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>11</b>
А.А. Александрова, И.М. Баранов, К.К. Гук МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ.....	11
М.А. Малыга, И.А. Просолов, К. Г. Антоненко, В. С. Горяинов ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРЕЛЛЫ .....	14
D.Tz. Dimitrov EFFECT OF MECHANOACTIVATION ON THE PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE UNDER EXPOSURE OF ULTRAVIOLET LIGHT .....	17
И.Е. Ануфриев, Е.Н. Муратова, Д.В. Королев РАЗРАБОТКА ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЛИПОСОМ .....	21
С.А. Аристов АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ .....	25
А.Ю.Атаян РАЗРАБОТКА ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИМ АППАРАТОМ.....	27
И.К. Бакшеев, И.А. Ларионов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА.....	31
В.П. Безверхний МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИИ СЛОЕВ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА .....	35
Я.А. Висурханова, Е.А. Соболева, М.Е. Бейсенбекова МЕДЬ- И СЕРЕБРО-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ КАРБОНИЗИРОВАННОГО МЕЛАМИНОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО ПОЛИМЕРА И ИХ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА .....	39
А.Ю. Гагарина, К. Халугарова, З.В. Шомахов, Ю.М. Спивак ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА НИКЕЛЯ МЕТОДОМ РФЭС ....	43
К.А. Ганичкина, Н.В. Латухина, О.А. Львова, Н.П. Козлов БИОСЕНСОР ГЛЮКОЗЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ.....	46
К.В. Герасимова, А.М. Гукетлов, З.В. Шомахов, С.С. Налимова РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОКСИДНЫХ НАНОСТРУКТУР.....	49

Р.А. Двоеглазов, А.В. Соломникова, В.И. Зубков ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОБРАЗЦАХ P-N SiC ОТ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ.....	51
Д.Ю. Дичковский, У.А. Кузьмина, И.А. Ламкин ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЁНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ С ДОБАВЛЕНИЕМ ФУЛЛЕРЕНА C <sub>60</sub> .....	55
Д.А. Шишкина, Д.А. Жигаев МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ.....	57
Н.Н. Жогаль, А.В. Соломникова, Г.Е. Яковлев ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ SiC ДИОДОВ ШОТТКИ.....	60
В.В. Злобин ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМОРФНЫХ МОДИФИКАЦИЙ TiO <sub>2</sub> В УСЛОВИЯХ МЯГКОЙ ХИМИИ.....	65
В.В. Иванова, В.В. Злобин СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СО СТРУКТУРОЙ ПИРОХЛОРА В СИСТЕМЕ TiO <sub>2</sub> -GD <sub>2</sub> O <sub>3</sub> МЕТОДОМ ГОРЕНИЯ.....	66
Т.В. Иванова, Н.С. Пщелко, Е.С. Чичков ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОДЛОЖКАМ ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ .....	68
Л.И. Ивкин, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков ИЗМЕРЕНИЯ ДИОДОВ С S-ОБРАЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ВИРТУАЛЬНЫМ ПРИБОРОМ НА БАЗЕ Ni Pxi.....	71
А.В. Ильин ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИК ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ.....	75
А.Е. Кемелбекова, Д.М. Мухамедшина, Д.О. Мурзалинов, Н.В. Идрисов ЭФФЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ZNO НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ.....	78
И. К. Киндюшов, К. Н. Пунегова ИСТОЧНИКИ УЗКОПОЛОСНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА.....	81
В.А. Коптелова, А.М. Гукетлов, В.М. Кондратьев, С.С. Налимова, З.В. Шомахов, А.И. Максимов РАЗРАБОТКА СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ СТАННАТА ЦИНКА.....	85
Н.А. Харьковчук, С.А. Корягин РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ .....	88
М.А. Богачёв, К. Т. Макарова ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ TiO <sub>2</sub> И SiO <sub>2</sub> .....	92
И.А. Мельниченко, А.М. Надточий, К.А. Иванов, И.С. Махов, М.В. Максимов, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ INGAAS/GAAS КВАНТОВЫХ ЯМА-ТОЧЕК С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ МЕТОДОМ АП-КОНВЕРСИИ .....	96

О.П. Михайлов, А.Э. Дегтерев, И.А. Ламкин ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ДЕГРАДАЦИИ ПЛЕНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ .....	100
А.И. Никифоров, Д.В. Королев, Г.А. Шульмейстер СИНТЕЗ ЛИПОСОМАЛЬНОГО КВИНАКРИНА, ИЗУЧЕНИЕ ЕГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КИНЕТИКИ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА.....	104
И.А. Новиков ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОФОБНО-ГИДРОФИЛЬНЫХ СВОЙСТВ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ АСМ .....	108
М.Д. Павлова, И.А. Ламкин, Е.М. Юрченко ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	112
К.В. Панкрашкина ЕМКОСТНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК ОБНАРУЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА .....	115
Н.А. Полуэктова, Д.А. Шишкина, А.М. Голштейн, И.А. Шишкин МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ .....	119
Радайкин Д.Г., Бобков А.А. ОБЗОР ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД.....	121
И. Д. Семененко, А. В. Пудова, Т. М. Зимина СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО И ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ПРИНЦИПОВ НАГРЕВА ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ МИНИАТЮРНЫХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПЦР-АНАЛИЗА.....	125
Р.С. Смердов НИЗКОВОЛЬТНЫЕ АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ НА БАЗЕ НОВЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СПЕКТРОСКОПИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ .....	129
В.О. Смирнова, А.В. Пудова ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ ОДНОРАЗОВОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВИНЦА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ .....	133
И.О. Тестов, В.И. Крохманский, Н.А. Иванов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК .....	136
В.А. Фролова, Т. М. Зимина, К.А. Пров ОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ КАРОТИНОИДОВ .....	140
К. Халугарова СПОСОБЫ ИНКОРПОРИРОВАНИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СЕНСОРИКИ И БИОМЕДИЦИНЫ.....	143
Е.Д. Холопова УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ СПЕКТРОВ.....	147

Шагимуратова А.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА .....	151
А.А. Шаров, А.Э. Дегтерев, И.А. Ламкин СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ, СОДЕРЖАЩИХ КОЛЛОИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ .....	154
М.В.Шумило, Д.В. Королев РАЗРАБОТКА КОНЪЮГАТОВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ОКСИДОМ АЗОТА.....	158
О.Ю. Бочарова СРАВНЕНИЕ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ США, ЕС И РФ.....	163
О.Ю. Бочарова ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РИСКОВ ОРГАНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СЕРТИФИКАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ.....	165
М.Л. Григорьева, М.А. Косухина АНАЛИЗ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ПРОДВИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ СТАРТАПА И ВЫЯВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ.....	167
Е.Д. Гухман, М.А. Косухина ОБЗОР МЕТОДИК ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ .....	171
Д.Е. Демидова, О.Д. Наумова, О.С. Артамонова ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ FACE ID ДЛЯ ЦЕЛЕЙ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА .....	175
О.А. Иванов СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ .....	178
А.Д. Кокоулин, Н.Ю. Недосекина ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА КАК ОСНОВЫ ДЛЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	183
А.В. Логачева, Ю.И. Михайлов ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ .....	185
А.Д. Кокоулин, Н.Ю. Недосекина ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА «НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЦЕЛИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ».....	188
М.А. Пикуль РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ ДОСТИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА .....	190
В.И. Потопаев, Г.В. Асеев ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И АНАЛИЗ ЕГО СТРУКТУРЫ ДОХОДОВ ОТ ПЕРЕВОЗОК.....	192
К.В. Юматова, М.А. Косухина ПРОБЛЕМЫ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА В СФЕРЕ ФИНАНСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ .....	197

**СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ..... 201**

А.А. Богатов  
СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ..... 201

Э.Р. Геймонен, И.В. Генсер  
СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ..... 204

Л.А. Зиганшина, К.А. Порохненко  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ..... 209

**СЕКЦИЯ ЛИНГВИСТИКА ..... 212**

Д.А. Лаврентьев  
ЭМОЦИОНАЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫЕ ЯЗЫКОВЫЕ СРЕДСТВА В ДИСКУРСЕ АНГЛОЯЗЫЧНЫХ СМИ ..... 212

**СЕКЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ..... 215**

Д.Е. Алышев  
ЦИФРОВОЙ ПИКсель ..... 215

А.М. Grinev, R.S Siry  
PIXEL APERTURE OPTIMIZATION FOR DOWNSAMPLE ALGORITHM ..... 219

А. С. Ельцов  
АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА СИГНАЛА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ..... 222

И.Н. Рыжман, Д.В. Холодняк  
МАЛОГАБАРИТНЫЙ СИНФАЗНО-ПРОТИВОФАЗНЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ  
НА ИСКУССТВЕННЫХ ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ ..... 226

К. С. Салувава  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХРАЗЯДНОГО КАЛЬКУЛЯТОРА ДВОИЧНЫХ ЧИСЕЛ ..... 230

Т. Самсонова  
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС DKART AIS WEB MICRO ..... 234

Р.С. Сирый, А.М. Гринёв  
ОЦЕНКА ОБНАРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ ..... 238

Х.Н. Чан, А.С. Подстригаев, Ч.Н. Нгуен  
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНЫХ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ  
АППРОКСИМАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ..... 242

## ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

### АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ДИЗАЙН И ИЕРАРХИЧЕСКИЕ НАНОСТРУКТУРЫ (R@D-МАГИСТЕРСКАЯ ПРОГРАММА «НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИКА»)

В.А. МОШНИКОВ

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

**Аннотация.** Рассмотрены основные вопросы организации и реализации магистерская программа «Нанотехнология и диагностика» в рамках приоритетного научно-образовательного R&D-направления «Биоинтерфейс». Особое внимание уделено новым направлениям наноматериаловедения- атомно-молекулярному дизайну и иерархии наноструктур.

**Ключевые слова:** *атомно-молекулярный дизайн, иерархические наноструктуры, ориентированное сращивание, мезокристаллы, фрактально-перколяционные структуры, сенсоры нового поколения.*

Содержание основных дисциплин магистерской программы «Нанотехнология и диагностика» ориентировано на трансдисциплинарный подход, позволяющий обоснованно реализовать моделирование, синтез и исследование искусственных биомиметических функциональных аналогов природных материалов с развитым полиморфизмом, конформационной и конфигурационной лабильностью. определяющих многообразие свойств и возможных областей применения, включая неинвазивную сенсористику, генерацию и рекуперацию энергии, органо- и нейропротезирование.

Каждому магистранту в начале обучения назначается руководитель из числа ведущих педагогических и научных кадров, как правило, докторов наук. Фактически обучение в исследовательской магистратуре по форме это мастер-класс руководителя. Мастер (научный руководитель) формулирует магистру общее научное направление и стратегическую задачу на весь период обучения. Научная задача определяет перечень дисциплин, которые должен освоить магистр. Основной упор делается на практические исследования.

О научной подготовке магистров можно судить по конкретным мастер-классам.

В 2021 г. тематики мастер-классы были следующими (но гибкая система образования обеспечивает вариацию тематик исследований. Среди мастеров, также готовых к руководству R&D-магистрантами, опытные преподаватели Александрова О.А., Кононова И.Е., Налимова С.С., Мараева Е.В., Пермяков Н.В., Бобков А.А., Мазинг Д.С., Гареев К.Г., Ильин В.А., Афанасьев А.В., Хмельницкий И.К.):

Атомно-молекулярный дизайн и синтез. Биомиметика, природоподобные материалы, биоинтерфейс. Микро- и наносистемы с критической миссией (проф. Лучинин В.В.)

Нетрадиционные механизмы роста. Ориентированное сращивание. Мезокристаллы. Фрактально-перколяционные наноструктуры. Коллоидные квантовые точки, золь-гель технология, пористые иерархические наноструктуры, газовые сенсоры и биосенсоры, узкозонные полупроводники, солнечные элементы (проф. Мошников В.А.)

Физика полупроводников, наноэлектроника, емкостная и адмиттансная спектроскопия, квантово-размерные структуры (квантовые ямы, квантовые точки), широкозонные полупроводники (GaN, алмаз), матричные фотоэлектронные устройства,

компьютерные технологии и автоматизация эксперимента, виртуальные приборы (проф. Зубков В.И.)

Моделирование физических механизмов получения алмазов, графенов, углеродных нанотрубок, разработка и оптимизация структур на их основе, моделирование отдельных приборов на основе этих и иных углеродных материалов (проф. Алексеев Н.И.)

Экспериментальные исследования электрических и оптических свойств полупроводниковых полимерных и композитных материалов, а также приборов органической электроники на основе полимерных наноструктур: органических светодиодов, полевых транзисторов, полимерных солнечных элементов, элементов нейроморфных сетей (проф. Алешин А.Н., ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН)

Микро- и наносистемная техника, измерительные и микромеханические преобразователи, сенсорика, проектирование и технология датчиков, размерные и кооперативные явления в микро- и наноструктурах (проф. Корляков А.В.)

Квантовая теория поля, электродинамика движущихся сред, нелинейные поля в вакууме и геометрия пространства-времени, физика полупроводников, теория экситонов и поляритонов, методы теории групп в квантовой механике и физике твердого тела. Расчет зонной структуры фотонных кристаллов (проф. Глинский Г.Ф.)

Технология выращивания объемных монокристаллов карбида кремния, физико-химические основы технологии роста объемных монокристаллов, физика ростовых дефектов; эпитаксиальный рост на неизоморфных подложках, бикристаллография границ раздела, рентгендифракционные методы исследования ростовых объектов (проф. Лебедев А.О.)

Сканирующая микроскопия сопротивления растекания, атомно-силовая микроскопия, пористые материалы, мезопористый кремний, микропористый кремний, системы адресной доставки лекарств на основе пористого кремния, функциональный состав поверхности, применение пористого кремния в медицине (доц., докторант Спивак Ю.М.)

Физика окислов переходных металлов и аморфных полупроводников, возобновляемая энергетика, солнечные элементы. (проф. Теруков Е.И., ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН)

Разработка и исследование аналитических микросистем, лабораторий на чипе (ЛНЧ), биочипов для биомедицинских применений. Конструирование и создание прототипов функциональных элементов ЛНЧ, сопряженных с микрофлюидной системой, элементы фотоники, СВЧ (доц. Зимина Т.М.)

Моделирование теплофизических процессов, теплофизика микро- и наносистем, микрофлюидика, микронаносенсоры и актюаторы, микро и наноэнергетика, микророботы, физика высоких плотностей энергии. (доц. Бройко А.П.)

Фотокатализ и фотокаталитические системы, пьезоэлектрические нанокристаллы. Физико-химические особенности синтеза, моделирования и функционирования полупроводниковых фаз переменного состава (доц. Максимов А.И)

Доклад посвящен атомно-молекулярному дизайну и иерархическим наноструктурам. Но для более глубокого («домашнего») анализа желающих поступить в R&D магистратуру в списке литературы приведены основные книги, авторами которых являются руководители мастер-классов. Большинство книг можно бесплатно скачать из интернета.

### Список литературы

1. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы/ Под ред. В. В. Лучинина, Ю. М. Таирова. М.: Физматлит, 2006, 552 с.
2. Наночастицы, наносистемы и их применение: в 2 ч. Ч. 1. Коллоидные квантовые точки / под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. Уфа: Аэтерна, 2015. 236 с.
3. Наночастицы, наносистемы и их применение: в 2 ч. Ч. 2. Углеродные и родственные слоистые материалы для современной нанoeлектроники / под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. Уфа: Аэтерна, 2016. 330 с.
4. Лучинин В.В., Хмельницкий И.К. Безопасность продуктов и процессов наноиндустрии, нормативно-методическая база. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, 59 с.
5. Наночастицы, наносистемы и их применение. Сенсорика, энергетика, диагностика / под ред. В. А. Мошникова, А. И. Максимова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 280 с.
6. Карасев В.А., Лучинин В.В., Соколов А.И. Био- и квантово-информационные технологии в нанoeлектронике СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, 220 с.
7. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование: лаб. практикум / под ред. В. А. Мошникова и О. А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.
8. 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. 368 с.
9. Основы золь-гель-технологии нанокompозитов. 2-е изд. / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. СПб.: ООО Техномедиа / изд-во «Элмор», 2008. 255 с.
10. Основы водородной энергетике / под ред. В. А. Мошникова и Е. И. Терукова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 288 с.
11. Ильин С.Ю., Лучинин В.В. Архитектурная фотоника: Интеллектуальные стекла. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, 128 с.
12. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение / под ред. В. А. Мошникова. СПб.: Технолит, 2008. 240 с.
13. Золь-гель-технология микро- и нанокompозитов: учеб. пособие / В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, Т. В. Хамова, О. А. Шилова.: Лань, 2013. 304 с.
14. Грачева И. Е., Мошников В. А. Наноматериалы с иерархической структурой пор: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 107 с.
15. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур: учеб. пособие / В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, Н. В. Пермьяков. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 144 с.
16. Мошников В. А., Александрова О. А. Новые углеродные материалы: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. 92 с.
17. Мошников В. А., Спивак Ю. М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 80 с.
18. Александрова О. А., Мошников В. А. Физика и химия материалов оптоэлектроники и нанoeлектроники: практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007. 68 с.
19. Александрова О. А., Давыдов С. Ю., Мошников В. А. Физика и химия материалов оптоэлектроники и углеродной нанoeлектроники: учеб. пособие СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 120 с.
20. Технология материалов микроэлектроники: от минерального сырья к монокристаллу: учеб. пособие / Д. Д. Авров, О. А. Александрова, А. О. Лебедев и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 154 с.
21. Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике/ под ред. В. А. Мошникова, О. А. Александровой. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 266 с.
22. Бобков А. А., Кононова И. Е., Мошников В. А. Материаловедение микро- и наносистем. Иерархические структуры. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 204 с.
23. Зятьков И. И., Максимов А. И., Мошников В. А. Сенсоры на основе полевых транзисторов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 56 с.

## СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА, НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМАТЕРИАЛЫ

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ

А.А. АЛЕКСАНДРОВА, И.М. БАРАНОВ, К.К. ГУК

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

**Аннотация.** В работе рассмотрены особенности взаимодействия рентгеновского излучения с образцами неоднородного состава, а именно взаимодействие излучения с поверхностью многослойных структур. Предложена математическая модель, описывающая поглощение рентгеновского излучения в многослойных структурах, выдвинуты предположения о дальнейшем прохождении излучения через такие образцы. Данная работа является частью общей модели генерации рентгеновского излучения в тонких пленках.

**Ключевые слова:** *рентгеноспектральный анализ; многослойные структуры; поглощение рентгеновского излучения; концентрационные профили*

#### **Введение**

Рабочие характеристики приборов, имеющих в своем составе тонкопленочные элементы, напрямую зависят от свойств используемых тонких пленок, свойства которых, в свою очередь, определяются химическим составом и толщиной покрытий [1-3]. В настоящее время в микроэлектронной промышленности нанесение тонких пленок на различные подложки с контролем параметров этих пленок на всех этапах производства по-прежнему является **актуальной задачей**, требующей упрощения и автоматизации. Среди различных методов определения толщины пленок и покрытий можно выделить рентгенофлуоресцентный анализ, основными преимуществами которого являются экспрессность и неразрушающее воздействие на исследуемый объект.

Однако в большинстве работ рассматриваются либо случаи исследования многокомпонентных образцов, в которых присутствующие элементы распределены в объеме образца равномерно, либо же многослойные структуры, но без учета возможности взаимодействия слоев и, как следствие, возникновения между ними промежуточного тонкого слоя.

В настоящее время активно изучаются многокомпонентные наноструктурные покрытия, в связи с чем при проведении рентгенофлуоресцентного анализа необходимо рассматривать ситуацию, когда в качестве исследуемого образца выступает чистая одно- или многокомпонентная пленка, нанесенная на полубесконечную подложку, химический состав которой отличается от составляющих исследуемую пленку веществ. Также на практике часто встречаются случаи, когда на полубесконечную подложку наносятся два (или более) тонких слоя различного состава. Важно отметить, что порядок нанесения слоев оказывает существенное влияние на форму спектра флуоресцентного излучения.

Подобные ситуации вносят серьезные коррективы в расчет интенсивности флуоресцентного излучения, регистрируемого детектором. Кроме рассеянного первичного излучения и характеристического излучения элементов пленки в упомянутых выше случаях

будет регистрироваться и флуоресцентное излучение элементов подложки, возбуждаемое первичным излучением, прошедшим через пленку.

Таким образом, **целью** данной работы является разработка программно-методического комплекса безэталонного контроля толщины пленок и покрытий с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. **Основная задача исследования:** анализ взаимодействия рентгеновского излучения с многослойной поверхностью.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в настоящее время не существует математической модели, описывающей формирование флуоресцентного излучения от сложного образца, представляющего собой состоящую из 2-3 веществ пленку, нанесенную на полубесконечную подложку, в состав которой входят 1-2 химических элемента, отличных от составляющих исследуемую пленку веществ.

#### **Учет особенностей формирования флуоресцентного излучения при анализе многослойных структур**

Как было указано ранее, нас интересует общий вид преобразования рентгеновского излучения при взаимодействии со сложной структурой и регистрация реального флуоресцентного спектра от образца пленки (пленок) на подложке (рис. 1).

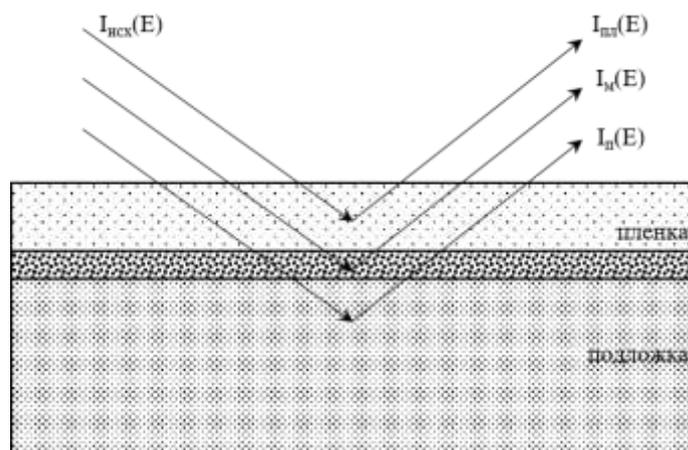


Рис. 1. Преобразование рентгеновского излучения в случае многослойной структуры.

На представленном рисунке  $I_{исх}(E)$  — спектральная интенсивность излучения с учетом поглощения в воздухе между выпускным окном и объектом;  $I_{пл}(E)$ ,  $I_{м}(E)$  и  $I_{п}(E)$  — спектральные интенсивности регистрируемых детектором сигналов от разных слоев: пленки, промежуточного слоя и подложки соответственно.

При расчете регистрируемых детектором спектров необходимо учесть, что возбуждение вторичного характеристического излучения в исследуемом многокомпонентном образце включает в себя, помимо прочего, дополнительное подвозбуждение характеристического излучения, поскольку пленка и подложка состоят из различных химических элементов. Более того, между пленкой и подложкой может установиться один из трех основных механизмов взаимодействия: адсорбция, абсорбция или химическое взаимодействие [4], вследствие чего на границе раздела двух слоев начинают протекать процессы взаимодиффузии и межфазная граница размывается (рис. 2).

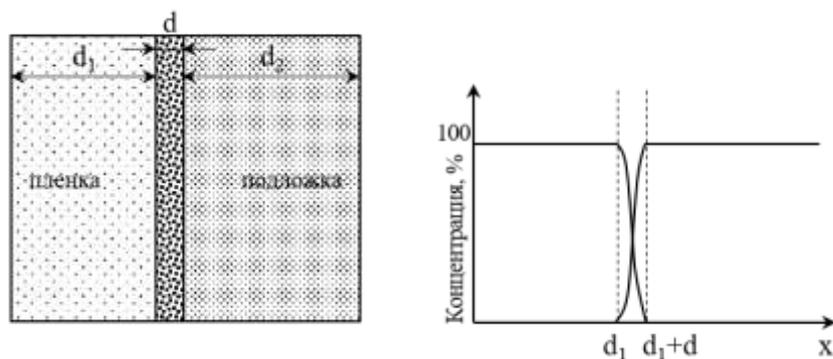


Рис. 2. Архитектура многослойной структуры и концентрационный профиль распределения атомов пленки на подложке:

$d_1, d_2$  — толщины пленки и подложки соответственно;  $d$  — толщина промежуточного слоя.

Поскольку граница между пленкой и подложкой не является резкой, а представляет собой некий градиент концентраций перехода вещества пленки в вещество подложки, было выдвинуто предположение, что для точного расчета спектральной интенсивности  $I(E)$  рентгеновского излучения, прошедшего через многослойный образец, последовательного применения закона Бугера-Ламберта-Бера к каждому слою недостаточно: необходимо знать профиль изменения концентрации в промежуточном слое между пленкой и подложкой:

$$I(E) = I_0(E) \cdot \exp(-\mu_1(E)\rho_1 d_1) \cdot \exp(-\mu_1(E)d \int_{d_1}^{d_1+d} \rho_1(x)dx) \times \\ \times \exp(-\mu_2(E)d \int_{d_1}^{d_1+d} \rho_2(x)dx) \cdot \exp(-\mu_2(E)\rho_2 d_2)$$

где  $\mu_1(E)$  и  $\mu_2(E)$  — массовые коэффициенты поглощения в пленке и в подложке;  $\rho_1, \rho_2$  — плотности веществ пленки и подложки;  $d_1, d_2$  — толщины пленки и подложки;  $d$  — толщина промежуточного слоя;  $\rho_1(x)$  и  $\rho_2(x)$  — профили концентраций веществ пленки и подложки в промежуточном слое.

Однако результаты расчета спектральной интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через сложный образец, показали, что учет тонкого промежуточного слоя, возникающего в результате протекания процессов взаимодиффузии между веществами пленки и подложки, не вносит изменений в спектр излучения, прошедшего через образец. Спектральные интенсивности излучения, рассчитанные с учетом промежуточного слоя и без него, полностью совпадают. Таким образом, для точного расчета спектральной интенсивности рентгеновского излучения, прошедшего через многослойную структуру, оказывается достаточным последовательное применение к каждому слою закона Бугера-Ламберта-Бера. Независимо от механизма взаимодействия вещества пленки и вещества подложки тонкий слой, возникающий в результате перехода веществ друг в друга, не влияет на спектр излучения, прошедшего через образец.

Безусловно, при толщине промежуточного слоя, сравнимой с толщиной пленки или подложки, вклад межфазной границы в поглощение структурой рентгеновского излучения будет более ощутим. Такие значения толщин нерезких межфазных границ при естествен-

ной взаимодиффузии не наблюдаются, но в процессе длительного взаимодействия слоев при повышенных температурах переходная область может значительно увеличиться.

### **Заключение**

Таким образом, в связи с вышеупомянутыми особенностями взаимодействия рентгеновского излучения с образцами сложного состава и конфигурации математическое описание концентрационного профиля распределения атомов пленки в приповерхностной области подложки и регистрируемого детектором спектра от сложного образца являются следующим этапом исследования. Важно учесть не только растворимость веществ пленки и подложки друг в друге, но и температуру, при которой будет происходить взаимодействие, и время этого взаимодействия.

Кроме того, в дальнейшем необходимо будет учитывать и тот факт, что излучение не распространяется вдоль одного направления, а расходится под некоторым углом и, соответственно, под разными углами падает на пленку и, проходя через нее, на подложку. Точно так же и отбор излучения детектором будет осуществляться с некоторой области.

Представленные выше соображения показывают, что расчет реального флуоресцентного спектра от образца пленки на подложке требует достаточно большого объема математических вычислений. В существующих на данный момент моделях, описывающих распространение рентгеновского излучения, его взаимодействие с веществом и формирование флуоресцентного спектра, особенности, указанные нами выше, не учитывались.

### **Список литературы**

1. Nygård K., Hämäläinen K., Manninen S., Jalas P., Ruottinen J.P. Quantitative thickness determination using X-ray fluorescence: Application to multiple layers // X-Ray Spectrometry. 2004. Vol. 33. P. 354-359.
2. Fiorini C., Gianoncelli A., Longoni A., Zaraga F. Determination of the thickness of coatings by means of a new XRF spectrometer // X-Ray Spectrometry. 2002. Vol. 31. P. 92-99.
3. Sitko R. Quantitative X-ray fluorescence analysis of samples of less than «infinite thickness»: Difficulties and possibilities // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2009. Vol. 64. P. 1161-1172.
4. Технология тонких пленок и покрытий: учеб. пособие / Урал. федер. ун-т; [под общ. ред. Л.Н. Маскаевой]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 236 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРЕЛЛЫ**

М.А. МАЛЫГА, И.А. ПРОСОЛОВ, К.Г. АНТОНЕНКО, В.С. ГОРЯИНОВ

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

**Аннотация.** Одноклеточная водоросль хлорелла играет важную экологическую роль в природных водах и является распространенным объектом лабораторных исследований, в том числе исследований ее оптических свойств. В ходе исследования были проведены съемки спектра флюоресценции образцов хлореллы, при воздействии на них излучением светодиода с длиной волны 460 нм. Получены спектральные характеристики и рассчитан квантовый выход флюоресценции.

**Ключевые слова:** природные воды, хлорелла, флюоресценция, волоконно-оптический спектрометр.

### **Введение**

Хлорофиллы — это пигменты, естественным образом присутствующие во всех растениях, которые поглощают свет. Основными формами хлорофилла в водорослях

являются хлорофилл *a* и хлорофилл *b*. Одноклеточная водоросль хлорелла (*Chlorella vulgaris*) содержит в своих клетках обе формы хлорофилла. Хлорофилл поглощает излучение в очень широком спектральном диапазоне от УФ до ИК, причем максимумы поглощения приходятся на синюю и красную область [1]. Часть поглощенной энергии излучается в виде флуоресценции при переходе клеток из возбужденного в основное состояние. Главная полоса флуоресценции расположена вблизи длины волны 685 нм [2, 3].

Хлорелла играет важную экологическую роль в природных водах, так как находится в основании пищевых цепей. Ее широкое распространение также обуславливает ее применение в качестве объекта различных лабораторных исследований.

**Целью данного исследования** является изучение влияния солнечного света на эффективность флуоресценции хлореллы, а также зависимости флуоресценции от концентрации суспензии хлореллы (исследования проводились для образцов с повышенной концентрацией, намного превышающей концентрацию в природных водоемах).

### Лабораторные измерения

Для проведения исследований была разработана и смонтирована лабораторная установка на основе волоконно-оптического спектрометра [4], схема которой показана на рис. 1.

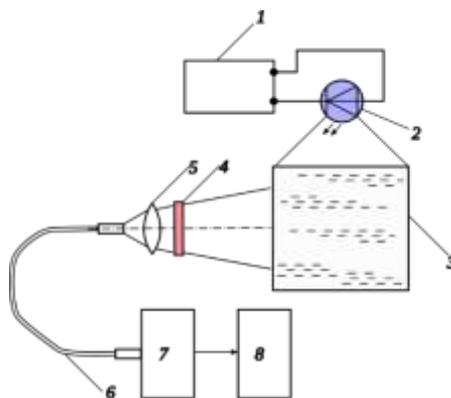


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Свет от диода 2, подключенного к лабораторному источнику питания 1, проходит через кювету с образцом 3, где возбуждает процесс флуоресценции. Излучение флуоресценции хлореллы проходит через прозрачную стенку кюветы, оптический фильтр КС13 (4), фокусирующую линзу 5 и попадает в оптоволоконно-оптический кабель 6, которое соединено со спектрометром Ocean Optics 7, подключенным к компьютеру 8.

Поскольку регистрация флуоресценции малой интенсивности требовала большого времени интегрирования спектрометра (5 — 20 с), при измерениях установку накрывали непрозрачной плотной черной тканью, чтобы исключить воздействие света от внешних источников.

Исследовались два образца хлореллы с разными условиями содержания: хранившийся в тени (теновой) и находившийся длительное время под воздействием солнечного света (освещенный). Для обоих образцов были проведены измерения для разных концентраций, это достигалось смешением суспензии хлореллы с дистиллированной водой.

Для расчета квантового выхода была использована формула:

$$\varphi = \frac{S_{\text{фл}}/k_{\text{КС13}}}{S_{\text{диод}}/(k_{\text{ОС6}} * k_{\text{ФС6}})}$$

где  $S_{\text{фл}}$  и  $S_{\text{диод}}$  — это мощности флуоресценции и излучения диода соответственно (площади под графиками спектральных характеристик интенсивности), а  $k_{\text{КС13}}$ ,  $k_{\text{ОС6}}$  и  $k_{\text{ФС6}}$  — это спектральные коэффициенты пропускания фильтров-стекол, использованных при измерениях. Графики зависимости квантового выхода флуоресценции хлореллы от ее концентрации приведены на рис. 2.

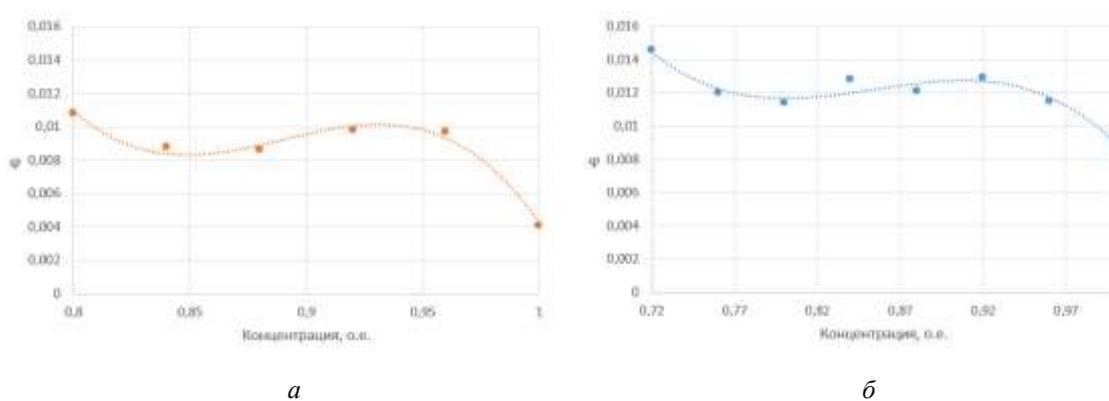


Рис. 2. Зависимость квантового выхода от концентрации хлореллы (а — теневой образец, б — освещенный образец).

## Заключение

Из графиков на рис. 2 видно, что образец, длительное время получавший энергию солнечного света, излучает интенсивнее, чем образец, находившийся в тени. Это может объясняться большим содержанием хлорофилла в клетках хлореллы. Также было замечено, что на максимальных концентрациях наблюдается обратная зависимость квантового выхода от концентрации хлореллы в растворе, что обусловлено слишком большой плотностью клеток хлорофилла и возможным поглощением излучения флуоресценции соседними клетками.

## Список литературы

1. Bricaud, A. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization / A. Bricaud, M. Babin, A. Morel, H. Claustre // *Journal of Geophysical Research*. — 1995. — V. 100. — P. 13321-13332.
2. Babin, M. Phytoplankton fluorescence: Theory, current literature and in situ measurement / M. Babin, C. S. Roesler and J. J. Cullen [eds.] // *Real-time coastal observing systems for ecosystem dynamics and harmful algal blooms*. UNESCO, 2008.
3. Teplicky, T. Fluorescence Properties of Chlorella sp. Algae / T. Teplicky, M. Danisova, M. Valica, D. Chorvat, A. Marcek Chorvatova // *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. — 2017. — V. 15. — P. 352-357.
4. Горяинов, В. С. Лабораторный измеритель гидрооптических характеристик на основе волоконно-оптического спектрометра / В. С. Горяинов, М. Хасенова, К. Г. Антоненко, А. А. Бузников // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. N. 2. — 2021. — С. 5-14.

## **EFFECT OF MECHANOACTIVATION ON THE PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE UNDER EXPOSURE OF ULTRAVIOLET LIGHT**

D.Tz. DIMITROV

*Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry and Pharmacy, Sofia University «St.Kliment Ohkridski», 1, J. Bourchier Blvd., Sofia 1164, Bulgaria*

**Abstract.** High-energy ball milling is method for processes such as mechanical alloying and mechanical milling. This is a way of modifying conditions in which chemical reactions usually take place. Positive effects of mechanoactivation on the photocatalytic of pure TiO<sub>2</sub> were observed only for nanoparticles, synthesized by a sol-gel method and Degussa P-25. The photocatalytic activity of doped TiO<sub>2</sub> increases under mechanoactivation. Degradation efficiency of doped TiO<sub>2</sub> were investigated towards degradation of organic pollutants and H<sub>2</sub> evolution.

**Key words:** *photocatalysts, titanium dioxide, mechanoactivation, ultraviolet light*

**An introduction in ball-milling.** High-energy ball milling has been a very popular method for processes such as mechanical alloying and mechanical milling. Chen et al. have stated that under milling conditions, the surroundings of an atom change in time because of two mechanisms acting in parallel: thermally activated jumps of point defects, as under classical thermodynamic equilibrium conditions, and forced processes such as shearing, sticking of powders along freshly formed surfaces, etc. [1].

A number of factors influence the rate at which mechanical alloying proceeds. These include the frequency with which a powder particle is involved in an effective collision event and the energy transferred from the grinding media to the powder particles. This energy transfer is believed to be a critical factor; indeed, mechanical alloying is often called a «high energy» ball milling technique, although «high» is never defined. The collision frequency is controlled several factors, including the ball to powder weight ratio. There is an inverse relationship between charge ratio and the time required to complete milling. The collision frequency is also controlled by the size of the milling balls.

**Effect of mechanoactivation on the photocatalytic properties of pure titania under exposure of ultraviolet light.**

— **TiO<sub>2</sub> nanoparticles under the UV illumination.**

The photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub> nanoparticles under ball milling was investigated under UV illumination [2]. Nanoparticles TiO<sub>2</sub> were synthesized by a sol-gel method and the effect of ball milling of dried gel on nanoparticle size effect on their photocatalytic activities was investigated. For this investigation the Congo red dye was chosen as the model pollutant. The sol was obtained through hydrolysis of tetra n-butyl titanate. The tetra n-butyl titanate was hydrolyzed and mixtures neutralized and dried. The comparison was done with a sample of photocatalytic degradation of Congo red for different sized TiO<sub>2</sub> nanoparticles after 30 min UV illumination. It shows that the nanoparticle size of 55 nm prepared at 550 °C is the optimum for which the photocatalytic efficiency is a maximum. These authors used a mixture of anatase (71.5%) and rutile (28.5%) phases.

— **TiO<sub>2</sub> (Degussa P-25) under UV light exposure.**

The changes in crystallites size, phase composition, morphology, sorption, and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> (Degussa P-25) resulting from mechanoactivation in planetary ball mill Pulverisette 5 under UV light exposure are reported [3]. Malachite green

oxalate (MG) and methylene blue (MB), representatives of the most important impurities in the textile industry wastewater. Generally, the sorption of the dye on the mechanoactivated TiO<sub>2</sub> is equal to or greater than sorption of the dye on the untreated product. The decrease of the pollutant concentration, found at the end of the equilibrium period, depends on: the milling vessel material, the activation mode (in air or as suspension), the time of mechanoactivation, the time between the mechanoactivation and the photocatalytic test; and the pollutant chemical nature.

The photocatalytic activity (PC) of TiO<sub>2</sub>, milled in agate vessel as methanol suspension, has a maximum at 1 h of milling time. The rate constant at these conditions is with 25% higher than the one of non-activated oxide. The activity of material treated in the same triboreactor but in air increases slowly with the activation time increase, reaching the rate constant value at 20% higher than of the initial TiO<sub>2</sub>. The results presented in current work reveal a clear dependence between the TiO<sub>2</sub> sorption ability and the PC activity. The materials milled as suspension in the agate vessel show relatively weak sorption properties and relatively higher photodegradation efficiency increasing simbotically with the sorption. Heavily milled product (in steel vessels and, to some extent, in the agate vessel, but in air) posses a rather strong adsorption.

**Effect of mechanoactivation on the photocatalytic properties of doped titania under exposure of ultraviolet light**

— **Anatase TiO<sub>2</sub> (NT-22)), by silver doping under ultraviolet (UV) illumination.** Aysin at al. [4] undertook the task to improve photocatalytic (PC) efficiency of TiO<sub>2</sub> powder (anatase NT 22), by silver doping and/or particle size reduction through mechanical planetary ball milling.

Photocatalytic performance of the powders was evaluated in the terms of the degradation of methyl orange (MO) solution under ultraviolet (UV) illumination. The particles in the milled and Ag-loaded powders seem more agglomerated than the ones in initial powder.

When two materials with different work functions, such as TiO<sub>2</sub> and Ag, contact each other, formation of a Schottky barrier is observed. In addition, Ag-loading increases the quantity of photogenerated charge carriers compared to unloaded TiO<sub>2</sub>. As a result, more departed photogenerated electrons and holes (h<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>) participate in the photodegradation process, resulting in higher PC efficiency.

— **Nanocrystalline Fe-doped TiO<sub>2</sub> powders under UV light irradiation.** Nanocrystalline Fe-doped TiO<sub>2</sub> powders could be synthesized from the TiO(OH)<sub>2</sub> powder by mechanical alloying (MA) with the Fe content varying from 0 to 4.8 wt.% [5]. To obtain the TiO(OH)<sub>2</sub> powder, a TiO(OH)<sub>2</sub> solution was first prepared from the intermediate stage in the HPPLT (Homogeneous Precipitation of TiO<sub>2</sub> Ultrafine Powders from Aqueous TiOCl<sub>2</sub> Solution), and then the solution was filtered. Based on the analysis of the photoluminescence spectra, the red shift was believed to be induced by localizing the dopant level near the valence band of TiO<sub>2</sub>. The effect of Fe addition for changing the powder color depended on the dopant concentration. In the present study, the higher Fe content than 4.57 wt.% decreased the UV-Vis absorption while turning the bright yellow to dark yellow.

— **Fe-doped TiO<sub>2</sub> under UV light irradiation.** The photocatalytic activity (PC) of undoped and iron-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles milled at different rotation speeds was evaluated in terms of degradation of Rhodamine-B under UV light irradiation [6]. Fe-doped TiO<sub>2</sub> samples, which were milled at higher rotation speeds, resulted in rutile crystallites with lower sizes. As the crystallite size is decreased, the particle's surface-to-volume ratio is increased; then the photo-generated electron-hole pairs could undergo a short pathway to migrate to the surface and

the  $e^-/h^+$  volume recombination rate should decrease giving rise to the improvement of PC activity.

— **A mixture of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> doped with Fe under UV irradiation.** Jho et al. investigated the synthesis and PC property of a mixture of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> doped with Fe by mechanical alloying process [7]. The PC activity of the synthesized TiO<sub>2</sub> powders and P-25 was analyzed by measuring decomposition rates of 4-chlorophenol (4-ClC<sub>6</sub>H<sub>4</sub>OH; 4-CP) in aqueous solution with various time. The degradation curves of 4-CP decreased with the increase of UV irradiation time. The degradation reaction rates with different catalysts were as follows: (a) P-25 < (c) anatase < (d) rutile < (b) 2 wt% Fe-doped mixture. The lifetime of the electrons and holes were enhanced by the Fe dopants in comparison with rutile, anatase, and P-25, because of electron or hole trapping at mixture TiO<sub>2</sub> band gap. Transition metal doped mixture TiO<sub>2</sub> decreased the band gap of TiO<sub>2</sub> and reduced the recombination of generated electron-hole pairs by difference in Fermi levels of anatase and rutile. Therefore, the Fe-doped mixture TiO<sub>2</sub> had the highest PC activity compared to P-25, pure anatase and pure rutile powders in the decomposition of 4-chlorophenol.

- **Hybrid composites of titanium dioxide and copper phthalocyanine under UV illumination.** Hybrid composites of titanium dioxide and copper phthalocyanine were synthesized by ball-milling assisted process in combination with mechanically stirring method [8]. TiO<sub>2</sub> nanopowder with average particle size about 50–100 nm was used as host material. 97% dye content of CuPc supplied was designated as guest material. The photocatalytic efficiencies of pure TiO<sub>2</sub> and 1 wt.% CuPc/ TiO<sub>2</sub> nanocomposite were scrutinized by the photodegradation of aqueous Rhodamine B (RhB) under UV illumination. The time for the decolorization of RhB by CuPc/TiO<sub>2</sub> photocatalyst was approximately 10 min faster than that of pure TiO<sub>2</sub>, implying that the PC activity was significantly enhanced by an assistance of CuPc loaded into TiO<sub>2</sub> photocatalyst.

— **Photocatalysts of MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> under UV irradiation.** At present, the composite photocatalysts of MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> cocatalyst and subjective semiconductor material were usually obtained via various complex reduction methods by using NH<sub>4</sub>MoS<sub>4</sub> or Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> as precursor [9]. The temperature of the reaction solution was maintained at 5 ± 0.5 °C by a flow of cooling liquid during the process of photocatalytic reaction. The total amount of H<sub>2</sub> was calculated using the volume ratio of sample loop and the total closed system, and the photocatalytic performances of H<sub>2</sub> evolution were compared by the average rate of H<sub>2</sub> evolution. The photo-generated electrons on the surface of MoS<sub>2</sub> would react with the adsorbed H<sup>+</sup> ions to form H<sub>2</sub> efficiently. The 4.0% MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> composite photocatalyst performed the maximal PC activity of H<sub>2</sub> evolution. Its rate of H<sub>2</sub> evolution was up to 150.7 μmol h<sup>-1</sup>, which was 48.6 times as high as that of TiO<sub>2</sub>.

**Conclusions.** Degradation efficiency of pure and doped milled TiO<sub>2</sub> were investigated towards degradation of pollutants under an ultraviolet light. The effect of ball milling of dried gel on nanoparticle size effect on their photocatalytic activities was investigated under UV illumination for TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized by a sol–gel method. It was found that the dye concentration in the solutions has been reduced due to decomposition of the dye by TiO<sub>2</sub> nanoparticles of size 55 nm.

The photocatalytic activity under UV illumination of TiO<sub>2</sub>, milled in an agate vessel as methanol suspension, has a maximum at 1 h of milling time. The rate constant at these conditions is with 25% higher than the one of non-activated oxide.

Ag-loaded TiO<sub>2</sub> exhibited a better photocatalytic activity under UV irradiation. When two materials that have different work functions, such as TiO<sub>2</sub> and Ag, contact each other, formation of a Schottky barrier is observed. Electron transfer from TiO<sub>2</sub> to Ag occurs. Ag atoms act as electron traps, capturing certain amounts of photoelectrons produced by UV excitation. As a result, more departed photogenerated electrons and holes (h<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>) participate in the photodegradation process, resulting in higher photocatalytic efficiency.

Fe-doped TiO<sub>2</sub> powders with a higher Fe doping than 4.57 wt.% induced the localizing dopant level near the valence band of TiO<sub>2</sub>, which decreased the UV-Vis absorption turning the bright yellow to dark yellow. The favorable effect of Fe-ion dopant in the enhancement of photocatalytic activity can be explained by the extended lifetimes of electron-holes pairs due to the double Fe<sup>3+</sup> function because it can act as an electron and hole scavenger. A mixture of anatase and rutile TiO<sub>2</sub> doped with Fe decreased the band gap of TiO<sub>2</sub> and reduced the recombination of generated electron-hole pairs by the difference in Fermi levels of anatase and rutile. Copper phthalocyanine-titanium dioxide hybrid composites of 1 wt.% CuPc/TiO<sub>2</sub> nanocomposite under UV showed a photodegradation efficiency of 87.5%.

Photocatalysts of MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> under UV irradiation was investigated in the photocatalytic performances of H<sub>2</sub> evolution. In the presence of MoS<sub>2</sub>, the photo-generated electrons in the conduction band of TiO<sub>2</sub> could be easily transferred to the surface of MoS<sub>2</sub> because of their intimate contact due to milling.

**Acknowledgement.** The authors acknowledge the Ms. Cortni Merritt, Writing Studio Coordinator, Keiser University, Orlando, for valuable improvement of English Language on our manuscript. Special acknowledgements to Ms. Galina Cheremushkina, Mr. Arthur Cheremushkin, Ms. Yana Cheremushkina for their care, help and support to make this work possible during Dr. Dimitrov's stay in Russia.

### References

1. Chen Y., Bibole M., Le Hazif R., Martin G. Ball-Milling-Induced Amorphization of compounds: A parametric study. *Physical Review B*. 1993, vol. 48, pp. 14-21. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.205109>.
2. Farbod M., Khademalrasool M. Synthesis of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles by a Combined Sol-Gel Ball Milling Method and Investigation of Nanoparticle Size Effect on Their Photocatalytic Activities. *Powder Technol.*, 2011, vol. 214, pp. 344–348. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.08.026>.
3. Uzunova-Bujnova M., Dimitrov D., Radev D., Bojinova A., Todorovsky D. Effect of the Mechanoactivation on the Structure, Sorption and Photocatalytic Properties of Titanium Dioxide. *Mater. Chem. Phys.* 2008, vol. 110, pp. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.02.005>.
4. Aysin B., Ozturk A., Park J. Silver-Loaded TiO<sub>2</sub> Powders Prepared through Mechanical Ball Milling. *Ceram. Intern.* 2013, vol. 39, pp. 7119–7126. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.054>.
5. Kim D. Hong H. S., Kim S. J., Song J. S., Lee K. S. Photocatalytic Behaviors and Structural Characterization of nanocrystalline Fe-doped TiO<sub>2</sub> synthesized by mechanical alloying. *J. Alloys Comp.* 2004, vol. 375, pp. 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.044>.
6. Carneiro J. O., Azevedo S., Fernandes F., Freitas E., Pereira Tavares C. J., Lanceros-Méndez S., Teixeira V., Synthesis of Iron-Doped TiO<sub>2</sub> Nanoparticles by Ball-Milling Process: The Influence of Process Parameters on the Structural, Optical, Magnetic, and Photocatalytic Properties. *J. Mater. Sci.* 2014, vol. 49, pp. 7476–7488. DOI 10.1007/s10853-014-8453-3.
7. Jho J. H., Kim D. H., Kim S. -J., Lee K. S. Synthesis and Photocatalytic Property of a Mixture of Anatase and Rutile TiO<sub>2</sub> Doped with Fe by Mechanical Alloying Process. *J. Alloys Comp.* 2008, vol. 459, pp. 386–389. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.285>.
8. Mekprasart W., Vittayakorn N., Pecharapa W. Ball-Milled CuPc/TiO<sub>2</sub> Hybrid Nanocomposite, and its Photocatalytic Degradation of Aqueous Rhodamine B. *Mater. Res. Bull.* 2012, vol. 47, pp. 3114-3119. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.08.024>.
9. Zhu Y., Ling Q., Liu Y., Wang H., Zhu Y. Photocatalytic H<sub>2</sub> Evolution on MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Catalysts Synthesized via Mechanochemistry. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, pp. 933–940. (2015) doi: 10.1039/c4cp04628e.

## РАЗРАБОТКА ЭКСТРУДЕРА ДЛЯ ГОМОГЕНИЗАЦИИ ЛИПОСОМ

И.Е. АНУФРИЕВ<sup>1</sup>, Е.Н. МУРАТОВА<sup>2</sup>, Д.В. КОРОЛЕВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, институт экспериментальной медицины*

**Аннотация.** Работа посвящена изучению вопроса о разделении липосом и разработка способа их уменьшения до необходимых размеров. Предложена конструкция и изготовлены с помощью 3D принтера модели экструдера из пластика различного типа. В качестве фильтра для липосом рассматривается возможность использования мембран на основе пористого оксида алюминия с диаметром пор около 150 нм.

**Ключевые слова:** липосомы, экструдер, мембрана, пористый анодный оксид алюминия.

### Введение

**Липосомы** — полые частицы, образованные из одного или нескольких амфифильных липидных бислоев. Впервые они были описаны Бенгхемом еще в 60-х годах, он обнаружил образование множеств везикул при взаимодействии мазков яичного лецитина и воды [1]. Интерес к этим частицам возник из-за возможности заключить внутри себя либо на своей поверхности различные классы веществ, от токсинов и неорганических ионов, до белков и низкомолекулярных органических соединений. Липидный бислой, образующий липосому, состоит из молекул, состоящих из гидрофильной полярной и гидрофобной неполярной частей.

Гидрофобные цепи липидов находятся во внутренней части бислоя, защищенные гидрофобным слоем снаружи. Стремление изолировать гидрофобную часть от воды приводит к сворачиванию плоского бислоя в замкнутые везикулы. Липосомы различных размеров обладают различным количеством бислоев и называются моноламеллярными и мультиламеллярными соответственно. Наибольший интерес представляют малые одноламеллярные липосомы, так как именно они подходят для капсул, осуществляющих целевую доставку внутри организма. Экспериментально установлено, что наилучший размер липосом для пассивного транспорта внутри организма — от 100 до 200 нм, при таком размере они достаточно малы чтобы беспрепятственно передвигаться и еще не объединяются в агрегаты [2]. Применение липосом в медицине позволяет увеличить терапевтический индекс лекарств, что ведет к уменьшению побочных действий существующих лекарств и возможности появления новых.

Для применения липосом в медицине необходимо получить однородные частицы заданных размеров, для этого применяют несколько методов [3]: конвекционный, звуковой, метод растворения и удаления детергента, метод высокого давления (экструзии), метод испарения с обращением фаз. Наиболее интересным является метод экструзии, так как он позволяет наиболее просто получить однородные липосомы заданного размера. Также, шанс разрушения липосом в ходе гомогенизации намного меньше, чем в других, например, озвучивании. Суть метода заключается в пропускании липосомального препарата через мембранный фильтр с выбранным размером пор.

Процесс идет под давлением с использованием специального оборудования — экструдера или подходящей индивидуальной установки.

Побочным положительным эффектом является фильтрация препарата от различных механических частиц и его стерилизация.

Одной из главных частей экструдера является мембранный фильтр, через который проходит препарат. Как правило, мембранные фильтры бывают двух типов: извилистые и ядерные трековые [4]. Мембрана извилистого типа состоит из волокон, перекрещенных друг с другом, образующих матрицу. Каналы из случайных пространств в этой матрице ведут извилистую траекторию от одной стороны мембраны к другой. Средний диаметр этих каналов контролируется плотностью волокон в матрице. Такие мембраны легко засоряются, когда через них проходят частицы размером больше диаметра канала. Ядерные мембраны состоят из тонкого непрерывного листа полимера, в котором сквозные отверстия с точными диаметрами были пробурены путем лазерного и химического травления. Такой фильтр подвергается меньшему засорению и частицы по выходу получаются более однородные. В основном на роль мембраны в экструдере используют ядерные мембранные фильтры, получаемые из поликарбоната, реже применяют обычные нейлоновые, поливинилиденфторидовые фильтры и другие типы микропористых мембран.

В данной работе рассматривается возможность использования мембран пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) в качестве фильтра для гомогенизации. Оксид алюминия отличается очень высокой механической прочностью и химической стойкостью, а его пористая структура обладает прекрасной однородностью пор, что позволит получать липосомы одинаковых размеров.

Таким образом, целью работы является изучение вопроса гомогенизации липосом и разработки конструкции экструдера для реализации этого процесса.

### **Экспериментальная часть**

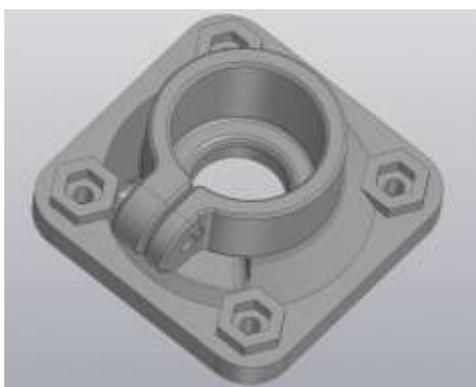
Процесс формирования пористого оксида алюминия давно известен [5-8]. Он заключается в электрохимическом анодировании алюминия в режимах постоянного тока или напряжения. В результате на его поверхности начинает расти оксидная пленка. Спустя некоторое время в ней начинают появляться механические дефекты, связанные с различием периодов кристаллической решетки у алюминиевой подложки и оксидного слоя. Эти дефекты являются зародышами для пор. Геометрические параметры этих пор зависят от режимов анодирования (напряжение, температура), которые в свою очередь определяются кислотностью электролита. В данной работе, для получения пор размером 100-200 нм (рис. 1) был использован электролит на основе ортофосфорной кислоты при напряжении анодирования 100...150 В. Также при анодировании необходимо поддерживать низкую температуру, иначе будет происходить изотропное травление, то есть полировка металла, а не формирование пористого оксидного слоя.

В случае, когда требуется изготовить сквозную пористую мембрану, то после получения пленки ПАОА на поверхности алюминиевой фольги, необходимо удалить оставшийся с обратной стороны образца слой алюминия. Это можно сделать либо химическим травлением, используя водный раствор хлорида меди с соляной кислотой [9], либо в концентрированном растворе ортофосфорной кислоты при температуре 50°C с помощью электрохимии. В данной работе был использован химический метод.

Так же в ходе работы был разработан макет экструдера. Авторами был выбран вариант ручного экструдера для гомогенизации малого объема малых размеров. Он состоит из 3 составных элементов: мембрана, шприцы для раствора, и конструкция,

соединяющая их вместе. За счет движения поршней шприцов создается необходимое давление, которое заставляет липосомы проходить сквозь мембрану. Для надежности и воспроизводимости эксперимента были выбраны стеклянные шприцы.

В результате было разработано несколько вариантов держателя мембран для экструдера. Все модели были строились в программе КОМПАС-3Д. Наиболее функциональный вариант представлен на рис. В этом случае герметичность конструкции обеспечивается тем, что мембрана зажимается между двумя похожими деталями с помощью болтов.



*Рис.1. 3D-модель одной из частей держателя мембраны.*



*Рис. 2. Фотография конструкции готового экструдера.*

Для 3D печати держателя мембран было использовано несколько видов пластика. Изначально использовался PLA(полилактид), но он оказался не достаточно прочным и не выдержал нагрузку болтов. Затем был выбран PETG(полиэтилентерефталатгликоль) с наполнителем. Но он оказался негерметичным и в ходе испытаний сквозь сам материал начала протекать вода. Чтобы увеличить прочность и герметичность еще сильнее выбор упал на PETG без наполнителя, который понижал его характеристики. В конечном счете получилась конструкция, полностью удовлетворяющая поставленным требованиям (РИС). Для проверки работы конструкции была проведена прогонка через фильтр на основе полиэфирсульфона с диаметром пор 200 нм. Исследована зависимость процентного соотношения липосом (K) от их размера (D).

$$K = \frac{N_i}{N_{\text{общ}}} \cdot 100\%$$

где  $N_i$  — число липосом определенного размера,  $N_{\text{общ}}$  — общее число липосом. График распределения представлен на рис. 3.

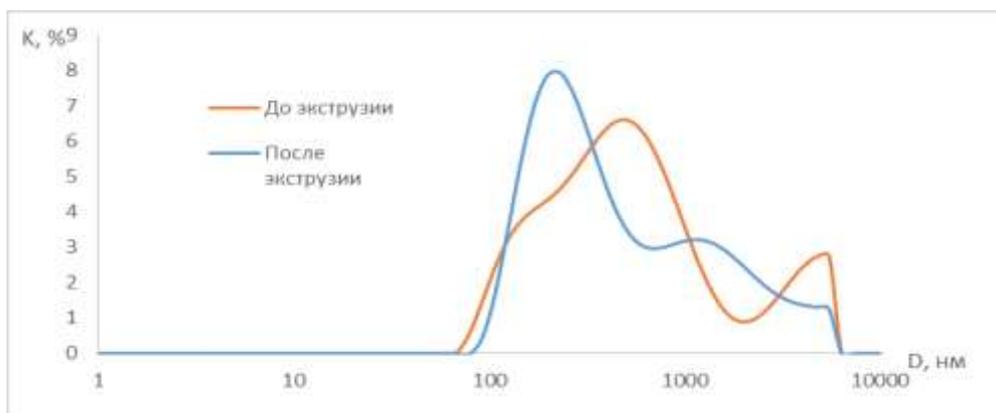


Рис 3. График распределения липосом по размерам до и после экструзии.

Как видно на рис. 3, применение экструдера предлагаемой конструкции с использованием фильтра на основе полиэфирсульфона позволило уменьшить общий размер липосом, при этом количество частиц необходимого размера возросло.

### Вывод

В работе описана актуальность использования липосом в адресной доставке лекарств. Показано, что существует несколько методов их гомогенизации. При этом выбор был сделан в пользу экструдера с мембраной для гомогенизации на основе пористого анодного оксида алюминия.

В ходе работы было спроектировано несколько вариантов экструдера и с помощью 3D-принтера напечатаны ключевые элементы. Проведен анализ эффективности конструкций и используемого пластика. Представлены схемы и фотографии готового экструдера. Выяснено, что пластик PETG без наполнителя лучше всего подходит для решения поставленных задач. Проведена предварительная проверка экструдера. Далее планируется проведение испытаний с различными типами мембран и растворов.

### Список литературы

1. В.А.Д. (1964). Negative Staining of Phospholipids and their structured modification by surface agents as observed the electron microscope . *J. MOL. Biol.*, 660-668.
2. Дмитриева М.В. Создание липосомальной лекарственной формы фотосенсибилизатора на основе борированного хлорина Еб. Диссертация на соискание ученой степени кандидата фармацевтических наук. 14.04.01. — Москва, 2015
3. Новикова А.А., Кезимана П., Станишевский Я.М. Методы получения липосом, используемых в качестве носителей лекарственных средств (обзор) // разработка и регистрация лекарственных средств/ май № 2 (19) 2017 Г.
4. Дмитриева М. В. Метод экструзии в технологии получения липосом / вестник вгу, серия: химия. Биология. Фармация, 2020, № 3.
5. Муратова Е.Н., Лучинин В.В., Мошников В.А., и др. Особенности формирования свободных наноразмерных пористых мембран оксида алюминия из фольги и новые области применения // Физика и химия стекла, 2017, Т.43, №2, С. 207-215.
6. Новые наноматериалы. Синтез. Диагностика. Моделирование. / Лабораторный практикум. Под ред. В.А. Мошникова, О.А. Александровой. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 248 с.
7. Наночастицы, наносистемы и их применение. Сенсорика, энергетика, диагностика» / Монография. Под. ред. В.А. Мошникова, А.И. Максимова. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 273с.
8. Vrublevsky I.A., Chernyakova K.V., Muratova E.N., Nalimova S.S., Moshnikov V.A. The sorption of water molecules in the pores of anodic alumina films during aluminum anodizing in oxalic acid // AIP Conference Proceedings, 2021, vol. 2388, p.020039
9. Петухов Д.И., Валеев Р.Г., Решетников С.М. Пористые анодные оксиды алюминия и титана: структура, свойства, синтез // Удмуртский государственный университет / Учебное пособие / Ижевск 2018

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.А. АРИСТОВ

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

Аннотация. В данной статье рассмотрены возможности применения оптических элементов для построения системы скоростного контроля и обработки данных, а также представлен анализ функционального состава бортовой системы контроля перспективных газотурбинных авиадвигателей.

**Ключевые слова:** *оптическая обработка сигналов, бортовая система дистанционного управления, контроль двигателя, бортовые оптоволоконные сети.*

Проводимые в настоящее время работы по созданию нового поколения высокоэффективных газотурбинных авиационных двигателей, конфигурация которых может быть изменена в зависимости от режима их работы [1, 2], привели к необходимости разработки высокоскоростных систем контроля и мониторинга двигателей. Как правило, такие системы строятся по принципу распределения функций и параллельной обработки и передачи данных. Однако потенциал приборов твердотельной электроники, составляющих сегодня основу систем обработки данных, по удовлетворению растущих требований к быстродействию уже практически подошли к своему теоретическому пределу.

Одним из важнейших факторов, ограничивающих быстродействие современной электроники, является паразитная ёмкость межсоединений, возрастающая при увеличении числа элементов на линии. Решить проблему ёмкости межсоединений при построении систем параллельной обработки и передачи данных можно только переходом на другие физические принципы обработки и передачи информации.

Одним из наиболее перспективных методов высокоскоростной обработки и передачи данных является применение оптических элементов. Оптика позволяет существенно увеличить информационную ёмкости канала благодаря возможности кодирования информации в изменении интенсивности, длины волны, фазы, типа поляризации и пространственных характеристик несущего оптического сигнала, а также возможности одновременной независимой передачи сигналов на разных несущих длинах волн по одному оптоволокну — мультиплексирования с разделением информации по длине волны (или спектральным уплотнением частотных каналов) [3, 4].

Благодаря этому увеличению информационной ёмкости, а также таким достоинствам оптоволоконных технологий, как невосприимчивость к электромагнитным помехам и отсутствие их генерации, высокие электрическая и пожарная безопасность, высокая стойкость ко многим агрессивным средам, малый диаметр и гибкость, используемых для передачи данных оптических волокон, минимальная масса, оптика уже давно используется для построения систем передачи данных, примерами которых являются Всемирная Информационная Сеть Интернет и оптическая система дистанционного управления бортовыми системами воздушных судов — система Fly-by-Light. Последние же успехи в изучении свойств оптических нелинейных материалов и фотонных кристаллов, достижения в технологии интегральной оптики и фотоники в совокупности с усовершенствованными схемами когерентного детектирования и методов модуляции [3]

сделали возможным реализовать систему контроля и управления, в которой передача информации и все необходимые её преобразования происходят в оптической форме без выполнения каких-либо оптоэлектронных и обратных электронно-оптических преобразований, особенно при использовании для детектирования и измерения необходимых физических величин оптоволоконных датчиков.

Однако полностью вытеснить твердотельную технологию из систем обработки данных оптика не может, т.к. она не способна производить выборочную обработку данных с точностью до одного бита и не совместима с существующими технологиями хранения данных. Таким образом, высокоскоростные системы обработки в будущем будут представлять собой гибридные устройства, включающие в себя как оптические элементы, так и элементы, выполненные по технологии твердотельной полупроводниковой электроники. Распределение функций, выполняемых этими элементами, будет производиться из анализа возможности реализации этих функций той или иной технологией, влияния на отношение сигнал / шум при выполнении функции тем или иным способом и энергопотребления, учитывающего потребление не только самих элементов (в случае оптических элементов — мощность, расходуемую на накачку оптической среды и создание условий для проявления нелинейных оптических эффектов), но также и энергопотребление необходимых вспомогательных устройств [3].

Исходя из таких соображений, можно видеть, что разделение системы контроля и управления бортовыми системами самолёта нового поколения, интегрированной с системами контроля и мониторинга двигателей, на оптическую и твердотельную части может быть следующим:

- оптическая часть включает в себя оптические датчики и оптоволоконную сеть, по которой осуществляется обмен цифровыми и аналоговыми данными с спектральным уплотнением частотных каналов между различными бортовыми системами воздушного судна [5-8] с возможностью выполнения простейших логических преобразований уже при прохождении сигнала по оптоволокну;
- электрическая или твердотельная часть ответственна за хранение данных и общий рамочный контроль выполнения алгоритмов работы бортовых систем, а также взаимодействие с экипажем воздушного судна и наземно-техническим персоналом, с чисто электрическими и электромеханическими системами самолёта.

Отсутствие возможности полностью исключить из своих процессов медленных стадий оптоэлектронного и электронно-оптического преобразований означает необходимость осуществления контроля быстрых процессов в оптической форме с минимальным числом данных преобразований, используемых в основном только для необходимого согласования с твердотельной частью, а также необходимость оптимизации самих процессов оптоэлектронного и электронно-оптического преобразований с целью снижения времени преобразования и энергопотребления. Эта оптимизация может быть проведена путём интеграции активных оптических элементов с пассивными, такими как фильтры и ответвители, а также фоточувствительной твердотельной электроники с усилительными и цифровыми каскадами, выполненными по той же технологии. Ожидается также работа по дальнейшему совершенствованию конструкции оптической части, оптического детектирования и алгоритмов модуляции и демодуляции для снижения уровня шумов с целью повышения точности преобразований.

Таким образом, уже в ближайшее время возможно появление первых образцов гибридных систем контроля и управления бортовыми системами, позволяющих безопасную эксплуатацию более эффективных газотурбинных авиационных двигателей. Полученный при создании этих систем опыт затем может быть использован для увеличения скорости обработки и передачи данных сетей Интернет, потребность которой также присутствует сегодня из-за развития технологий сетевого хранения данных и облачных вычислений.

В связи с этим успехи интеграции оптики и твердотельной электроники и реализации оптической обработки данных занимают важное место среди инженерных и исследовательских задач этого десятилетия.

### Список литературы

1. SABRE ENGINE: Single Stage to Orbit Rocket Engine / Rupesh Aggarwal Khushin Lakhara и др. // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015, № 10. p. 10360–10366.
2. Программы США по разработке принципиально новых технологий для двигателей шестого поколения военной авиации (обзор)/ Солонин В.И., Палкин В.А. // Авиационные двигатели. 2019, № 4(5). С. 63–74.
3. All-Optical Signal Processing / Alan E. Willner, Salman Khaleghi, Mohammad Reza Chitgarha // Journal of Lightwave Technology. 2014, № 4. p. 600–680.
4. Sarry F. Habiby, Raj Dutt. Optical network architecture, technology and component challenges in aircraft network applications / 2009 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Phototonics Technology Conference, San Antonio, TX, USA, 22-24 Sept. 2009, p. 062–063.
5. A Review of Fiber Optic Networks for Turbine Engine Instrumentation Channel: Control, PHM, and Test Cell Applications / Mehrdad Pakmehr, B. Moslehi, Vahid Sotoudeh и др. // 2016 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP), Long Beach, CA, USA, 31 Oct.-3 Nov., 2016., p. 001–017.
6. Optical sensors for fly-by-light flight control systems / Tahereh Ahmadi Tameh, Mohamad Sawan, Raman Kashyap // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference., Cleveland, USA, July 28-30, 2014., p. 295–296.
7. B.D. Zimmermann. Compatibility of multiplexed optical fiber sensors with optical communications systems onboard military and commercial aircraft / National Aerospace and Electronics Conference-NAECON 1993, Dayton, OH, USA, 24-28 May 1993, p. 1123–1128.
8. Mary Austin. Sensor application opportunities for aerospace propulsion systems / Fiber-Optics and Phototonics Technology Conference 2009, San Antonio, TX, USA, 22-24 Sept. 2009, p. 21–22.

## РАЗРАБОТКА ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИМ АППАРАТОМ

А.Ю.АТАЯН

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

**Аннотация.** В данной работе будет рассмотрен процесс создания пульта управления рентгеновским аппаратом. Актуальность разработки данного прибора заключается в необходимости проведения различных исследований, в рамках которых необходим контроль работы оборудования на расстоянии

**Ключевые слова:** *пульт управления, рентгеновский аппарат, рентген.*

Для рентгеновских исследовательских и диагностических комплексов актуально применение портативных систем управления, позволяющих осуществлять контроль работы установки на расстоянии.

Беспроводные технологии связи нашли широкое применение в области осуществления взаимодействия между устройствами. Так, большую популярность приобрела технология Bluetooth Low Energy (BLE), которая была создана для портативных устройств с батарейным питанием.

На рис. 1 представлена схема возможных вариантов осуществления управления рентгеновской установкой.

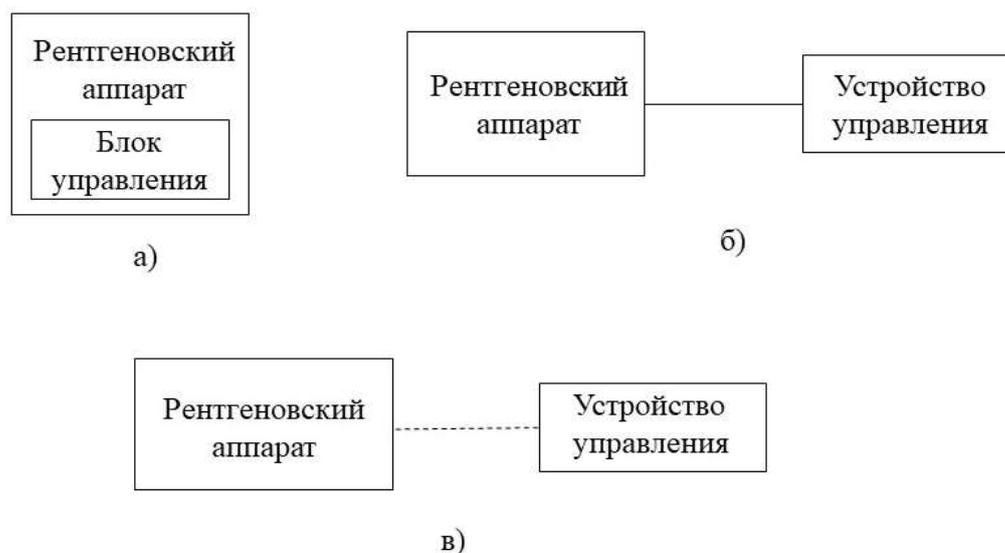


Рис. 1. Схемы управления рентгеновским аппаратом:

- а — блок управления располагается на рентгеновском аппарате*
- б — устройство управления связано с рентгеновским аппаратом с помощью проводной технологии связи*
- в — устройство управления связано с рентгеновским аппаратом с помощью беспроводной технологии связи*

Беспроводные технологии связи нашли широкое применение в области осуществления взаимодействия между устройствами. Так, большую популярность приобрела технология Bluetooth Low Energy (BLE), которая была создана для портативных устройств с батарейным питанием.

Для осуществления связи с рентгеновским аппаратом были выбраны следующие технологии: проводной интерфейс RS-485 и беспроводная технология BLE.

В таблице 1 представлены основные преимущества и недостатки технологии BLE.

Таблица 1

**Достоинства и недостатки технологии BLE**

№	Достоинства	Недостатки
1	Низкое энергопотребление	Малый объем передаваемых данных
2	Отсутствие соединительного кабеля	Ограниченный радиус действия
3		Относительно невысокая скорость передачи данных

Блок-схема разработанного устройства представлена на рис. 2. Рентгеновский аппарат связывается с устройством через BLE-модуль или с помощью интерфейса RS-485. На микроконтроллер (МК) поступают сигналы с оптической системы регистрации нажатия, расположенной на другой плате. По комбинации данных сигналов устройство принимает решение о передаче на аппарат команды установки накала или запуска рентгена.

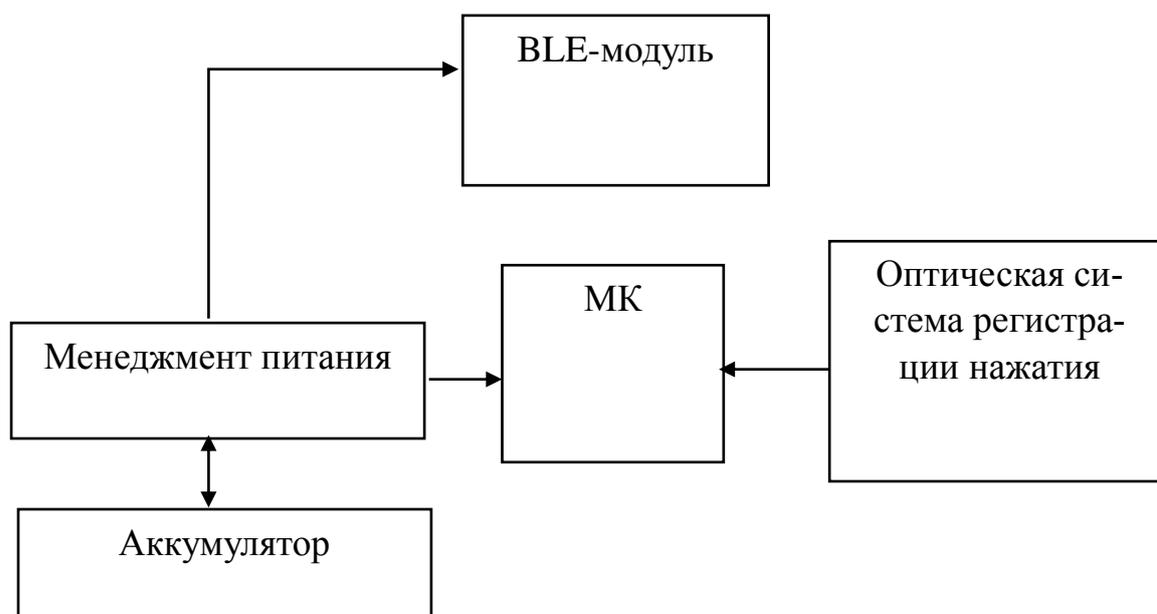


Рис. 2. Блок-схема портативного пульта управления.

Для осуществления связи по BLE устройству управления необходим специализированный модуль, поддерживающий данную технологию. В разработанном устройстве используется модуль HM-10, внешний вид которого представлен на рис. 2. В основе модуля HM-10 лежит чип CC2540. Передача данных происходит по интерфейсу UART.

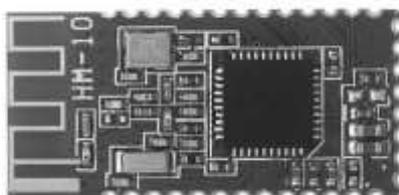


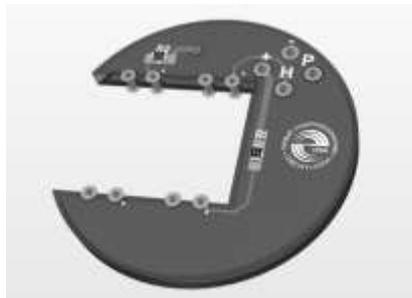
Рис. 3. Модуль BLE HM-10.

Устройство работает на батарейном питании с применением литий-ионного аккумулятора батарейного типа размера AAA. Была выбрана модель Li10440/350 емкостью 350 мА ч, номинальное напряжение которой равно 3,7 В. Для монтажа аккумулятора на плату устройства используется батарейный отсек 1xAA под пайку KLS5-801-A.

Подзарядка аккумулятора осуществляется с помощью микросхемы MCP73843-420I/MS. Также эта микросхема формирует питание для всех элементов системы.

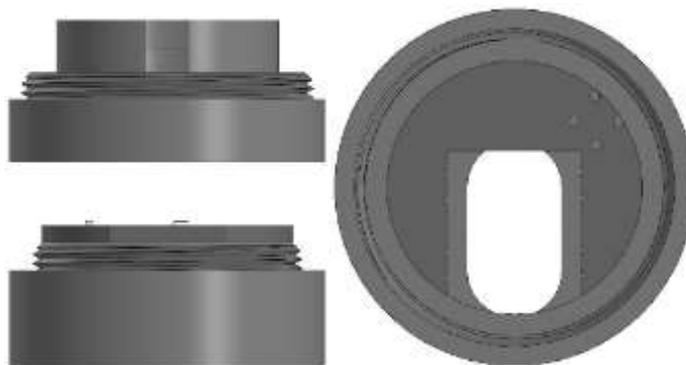
Плата оптической регистрации нажатия имеет следующий вид: по двум краям отверстия располагается две пары светодиод — фототранзистор, между которыми

в зависимости от положения кнопок перекрыт или нет поток света. Внешний вид 3d-модели разработанной платы регистрации нажатия представлен на рис. 4.



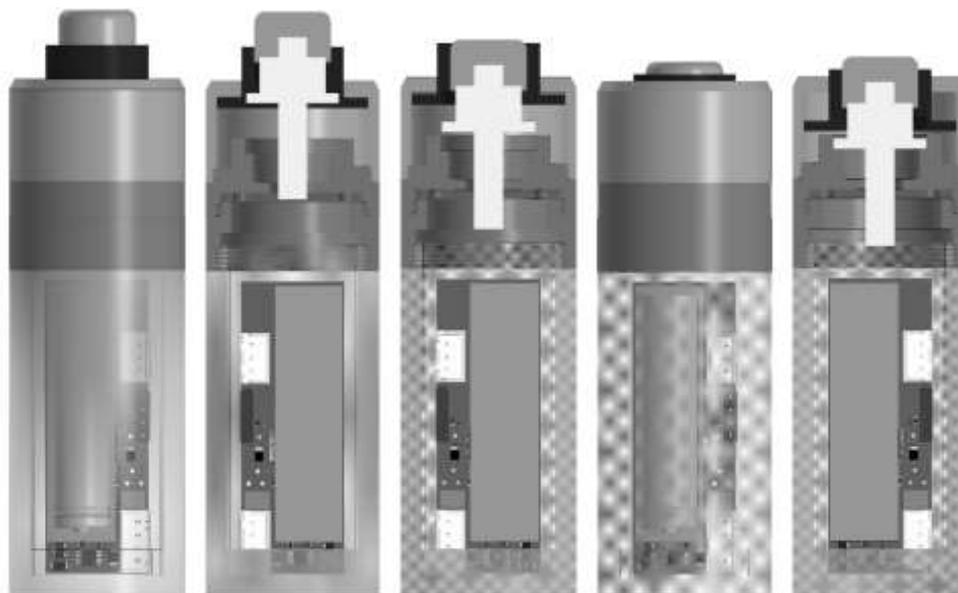
*Рис. 4. Плата для оптической системы регистрации нажатия.*

Плата помещается в корпус, изображенном на рисунке 5. Данная плата крепится между двумя деталями, которые скрепляются с помощью резьбового соединения. Плата ориентируется таким образом, чтобы разрез с фотодатчиками совпадал с отверстием под кнопки в корпусе. Шаг резьбы составляет 1 мм и был подобран экспериментально.



*Рис. 5. Крепление платы оптической системы регистрации нажатия*

Итоговый вид корпуса устройства представлен на рисунке 6. Нажатие желтой кнопки запускает накал, перекрывая свет между первой парой светодиод — фототранзистор. Далее, при окончании режима накала срабатывает вибромотор, что говорит о готовности аппарата запустить рентген. При нажатии красной кнопки на установку поступает сигнал о запуске рентгена.



*Рис. 6. Корпус портативного пульта управления.*

В результате разработки был создан опытный образец пульта управления рентгеновским аппаратом, осуществляющего запуск режима накала и рентгена.

#### **Список литературы**

1. Heydon R. Bluetooth Low Energy. The Developer's Handbook.
2. Townsend K., Davidson R. Getting started with Bluetooth Low Energy.
3. Перрин Б. Интерфейс RS-485 — наука и искусство.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

И.К. БАКШЕЕВ, И.А. ЛАРИОНОВ

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

*Аннотация.* В докладе рассматриваются особенности определения оптимальных параметров рентгеновского неразрушающего контроля муфтовых изделий из сшитого полиэтилена. Выполнено обоснование выбора необходимого напряжения для получения оптимального соотношения экспозиционная доза/контрастность. Исходя из выполненных расчетов выполнено заключение, что оптимальным напряжением для контроля полиэтиленовой изоляции муфтовых соединений составляет порядка 40–45 кВ.

*Ключевые слова:* рентгенографический контроль, сшитый полиэтилен, муфтовые соединения

В настоящее время в связи с активным развитием телекоммуникационных и силовых сетей, базирующихся на морском дне, все чаще возникает необходимость проведения мероприятий по контролю данных сетей [1-2]. В частности, стоят задачи по контролю соединительных элементов кабельных линий — муфтовых соединений. Проведение контроля соединений осуществляется посредством методов неразрушающего рентгеновского контроля [3].

Важным аспектом проведения любого рентгенографического и томографического исследования является определение оптимальных эксплуатационных параметров источника и детектора рентгеновского излучения. На примере разработанной модели муфтового соединения и с учетом характеристик детектора РИ, в т. ч. спектральных, выполнено обоснование выбора необходимого напряжения для получения оптимального соотношения экспозиционная доза/контрастность. Для решения данной задачи построена модель муфтового соединения с учетом используемых в нем материалов (рис.1), и проведено определение оптимального ускоряющего напряжения на рентгеновской трубке.

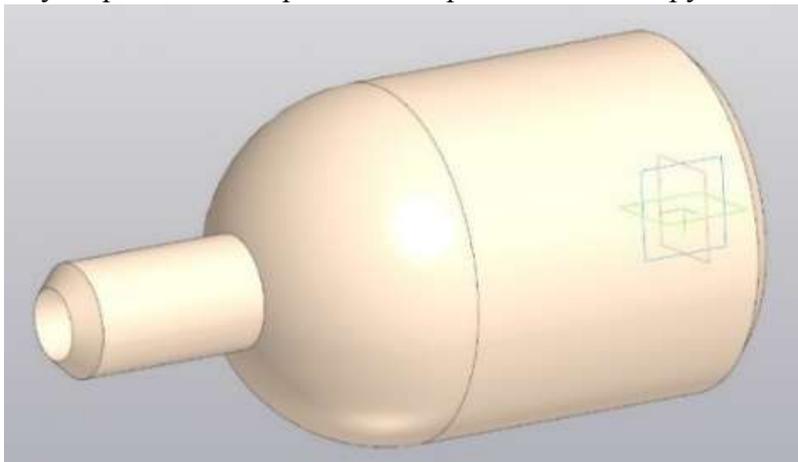


Рис. 1. Модель муфтового соединения.

В качестве материала муфтовых соединений кабельных линий чаще всего применяют сшитый полиэтилен (полимер этилена с поперечно сшитыми молекулами). По сравнению с обычным полиэтиленом, он является более плотным, имеет высокие технические показатели и используется для изготовления наиболее прочных полимерных изделий, выдерживающих различные нагрузки механического, химического либо геофизического происхождения. Кроме того, многие изделия являются устойчивыми к высоким температурам, что позволяет использовать его в соответствующих условиях, в частности для силовых кабелей. Общая формула соединения ( $C_2H_4$ ).

При определении оптимальных физико-технических параметров съемки, ток рентгеновской трубки в экспериментах принимается константой, т.к. его повышение ведет к увеличению размера фокусного пятна, что в данном случае является недопустимым.

Для моделирования идеализированного спектра излучения рентгеновской трубки использовалось следующее выражение:

$$I_0(E) = \frac{kiz(E_{max}-E)}{R^2},$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $i$  — сила тока рентгеновской трубки, [А];  $z$  — атомный номер материала мишени рентгеновской трубки;  $E_{max} = eU$  — максимальная энергия квантов в спектре излучения, [кэВ];  $E$  — энергия квантов в спектре излучения, [кэВ];  $R$  — расстояние от точки выхода излучения до точки контроля, [м].

В действительности при моделировании следует учитывать ослабление излучения в выпускном окне рентгеновской трубки, самопоглощение в мишени, поглощение излучения в воздухе между выпускным окном и объектом контроля.

С учетом перечисленного выражение для вычисления интенсивности излучения может быть записано как:

$$I(E) = I_0(E)e^{-\mu_0(E)X}, \quad (1)$$

где  $I_0(E)$  определяется по выражению (1);  $\mu_0$  — линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения [ $\text{м}^{-1}$ ];  $X$  — расстояние от точки выхода излучения до точки контроля, [м].

При наличии в исследуемом объекте определенного дефекта выражение (1) изменится следующим образом:

$$I_d(E) = I_0(E)e^{(-\mu_0(E) \cdot (X-d) - \mu_d(E) \cdot d)},$$

где  $I_0(E)$  — спектральная интенсивность излучения до объекта,  $X$  и  $\mu_0(E)$  — его толщина и линейный коэффициент ослабления соответственно,  $d$  и  $\mu_d(E)$  — толщина и линейный коэффициент ослабления дефекта.

Вычисление отношения суммарных интенсивностей излучения для дефектного и бездефектного объекта позволяет получить теоретические значения контрастности ( $K$ ) рассматриваемого дефекта:

$$K = \left| \frac{\int_0^{E_{\max}} I(E) - \int_0^{E_{\max}} I_d(E)}{\int_0^{E_{\max}} I(E)} \right| = \left| 1 - \frac{\int_0^{E_{\max}} I_d(E)}{\int_0^{E_{\max}} I(E)} \right| \quad (2)$$

В геометрическом смысле значение контрастности определяется отношением площадей под кривыми, образованными распределениями на графике (рис. 2).

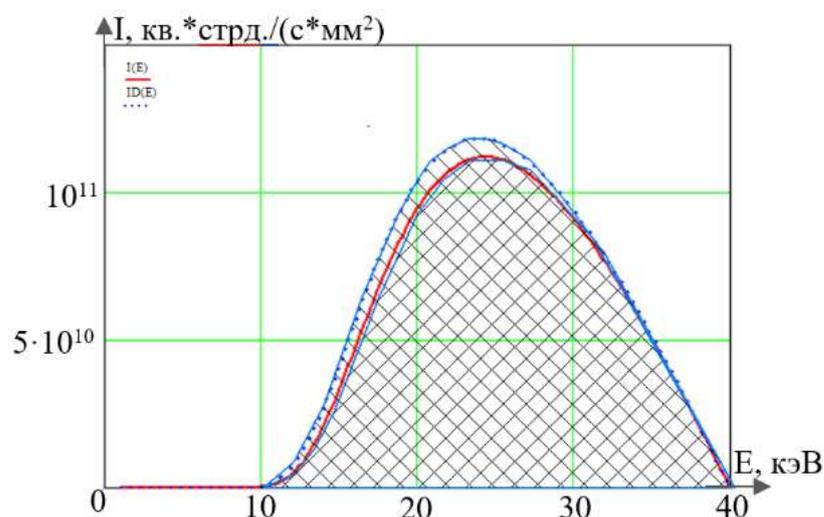


Рис. 2. Определение контрастности как отношения площадей под кривыми.

Результаты проведенного моделирования представлены на рисунках 3 и 4. Проведенные экспериментальные исследования муфтового соединения с заведомо известным дефектом (характерный размер дефекта исходя из особенностей объекта контроля составляет порядка 1 мм) показали согласованность с результатами моделирования.

Учитывая, что основной интерес при исследовании муфт представляет целостность и внутренняя структура полиэтиленовой оболочки, состоящей из легкоатомных материалов, определено оптимальное напряжение. При меньших напряжениях имеется ограничение, связанное с низкой спектральной чувствительностью цифрового детектора рентге-

новского излучения (рис. 3), при больших напряжениях — вместе с ростом ускоряющего напряжения повышается интенсивность излучения и соответственно растет яркость, однако также снижается контрастность изображения в соответствии с выражением (2) (рис 3). График на рисунке 4 демонстрирует результирующую функцию контраста от напряжения на рентгеновской трубке.

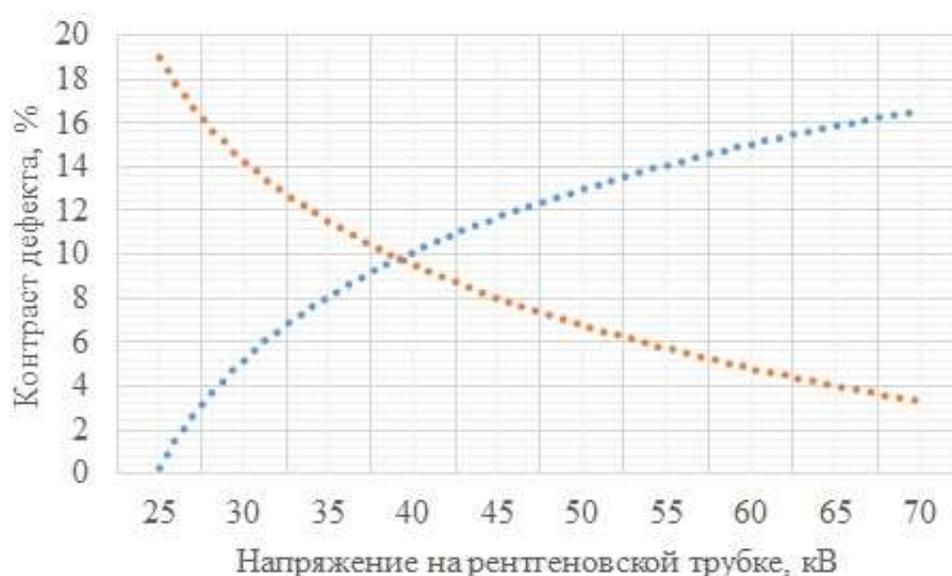


Рис. 3. Зависимость контраста от физических (красная кривая) и технических (синяя) ограничений.

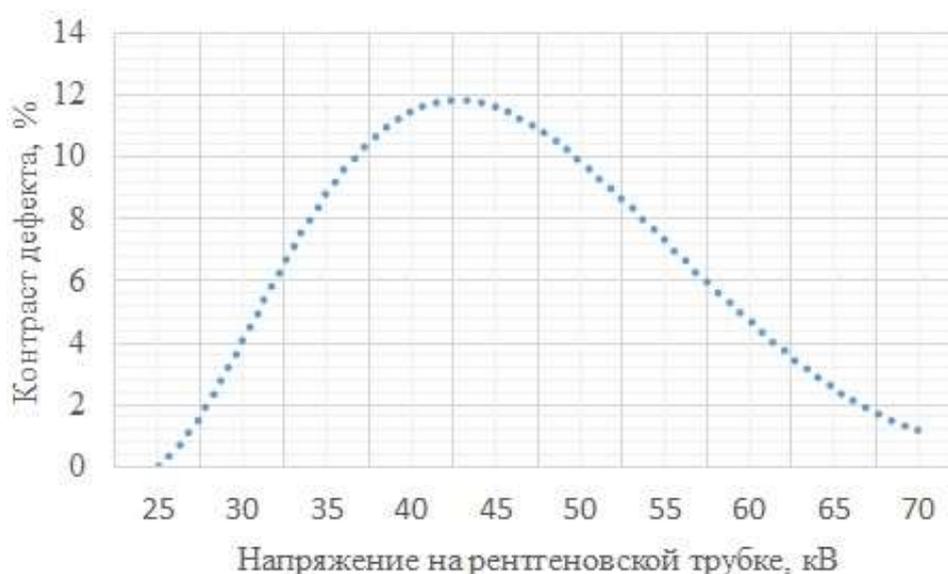


Рис.4. Результирующая зависимость контраста.

Исходя из выполненных расчетов можно заключить, что оптимальным напряжением для контроля полиэтиленовой изоляции муфтовых соединений составляет порядка 40-45 кВ.

## Список литературы

1. Bacchini M. et al. 200 kV DC extruded cables crossing the San Francisco Bay //Proc. CIGRE General Session. — 2010.
2. Nielsen W. F., Davenport T. Submarine cables and offshore energy //Submarine Cables. — Brill Nijhoff, 2014. — С. 351-373.
3. Якуб А. А. Цифровая радиография-новые возможности неразрушающего контроля //Прочность конструкций летательных аппаратов. — 2017. — С. 177-182.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИИ СЛОЕВ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА

В.П. БЕЗВЕРХНИЙ

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

**Аннотация.** В данной работе разрабатывалась модель получения наноструктурированных слоев на основе халькогенидов свинца. Проанализирован способ их получения, а также исследованы процессы, происходящие в его ходе. В результате была разработана модель этих процессов с использованием графического моделирования.

**Ключевые слова:** халькогениды свинца, наноструктурированные материалы, моделирование физико-химических процессов.

### Введение

Наноструктурированные слои халькогенидов свинца, подвергнутые сенсibiliзирующему окислению с образованием оболочечных структур, используются в ИК-технологиях для излучателей и фотоприемников. Целью данной работы является разработка компьютерной модели описывающей процессы получения и сенсibiliзации окисления наноструктурированных слоев халькогенидов свинца. Задача моделирования пористых наноструктурированных поликристаллических слоев халькогенидов свинца является актуальным предметом исследований, т.к. управление пористой структурой внутри зерна является способом создания наносистемы эффективных ИК-излучателей.

### Материалы исследования

На рис. 1 показано изображение слоев  $Pb_{1-x}Cd_xSe<I>$ , на основе которого проводилось моделирование.

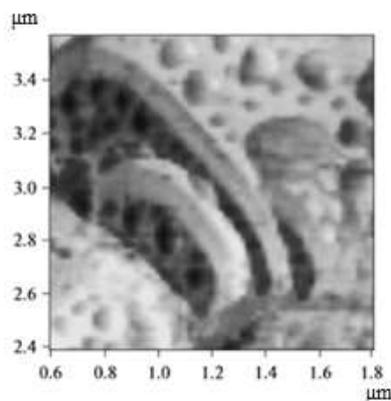


Рис. 1. Изображение срезанного зерна  $Pb_{1-x}Cd_xSe<I>$ , полученное методом АСМ методом латеральной силовой микроскопии [1].

Получение и изучение этих наноструктурированных слоев подробно описано в работах [1,2]. Чтобы материал приобрел светочувствительные и фотолюминесцентные свойства, его необходимо обработать в кислородсодержащей атмосфере, поскольку проникновение кислорода вглубь зерна будет улучшать эти свойства. Во время этой обработки на слоях халькогенидов свинца образуется внешняя оболочка из оксидных фаз, которая препятствует дальнейшему проникновению кислорода вплоть до полной остановки. Для решения этой проблемы использована обработка в йодсодержащей атмосфере. Соединения Pb и Cd с I<sub>2</sub> являются летучими при температуре обработки и легко удаляются с поверхности слоев, тем самым замедляется рост оксидной оболочки.

В то же самое время за счет активной реакции с йодом и эффекта Киркендалла-Френкеля образуются вакансии, которые постепенно диффундируют вглубь ядра. По мере роста концентрации вакансий они сливаются в результате стремления системы к уменьшению поверхностной энергии.

Кроме того, в изначальную шихту тоже можно добавить йод. Тогда рекристаллизация будет происходить в присутствии жидкой фазы, что обеспечивает большую степень удаления неизлучающих центров рекомбинации. На рис. 2 показана схема окисления зерна n-PbSe в присутствии йода в атмосфере и шихте.

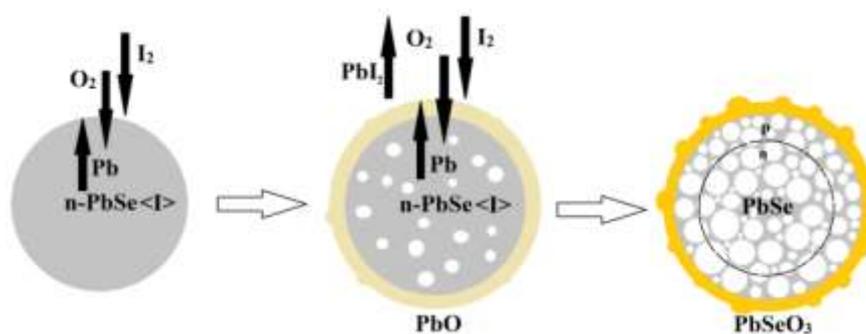


Рис. 2. Схема окисления зерна n-PbSe в присутствии йода в атмосфере и шихте. [1].

### Создание модели

Химические реакции, проходящие в системе, можно разделить на две группы: реакции с образованием оксидов, которые приводят к росту оксидной оболочки, и реакции с йодом. Анализ реакций в работе [3-9] показал, что соединения PbI<sub>2</sub> и CdI<sub>2</sub> легко переходят в газовую фазу. PbO, CdO, PbSeO<sub>3</sub>, CdSeO<sub>3</sub> не будут переходить в иодидные соединения. В итоге реакции с получением оксидов ведут к росту оболочки, а реакции с йодом к удалению полученных веществ.

Скорость роста оксидного слоя будет определяться следующим уравнением:

$$h^a = b \cdot t \quad (1)$$

Здесь  $a$  (примерно 1,5..2) и  $b$  — эмпирические коэффициенты.

Рост оксидного слоя постепенно замедляется вплоть до его полной остановки при некоторой критической толщине. Однородность роста нарушается тем, что в исходной шихте имеется йод, и летучие соединения иодидов свинца и кадмия могут образовываться в самом ядре и создавать локальные каналы для выхода на поверхность оболочка-атмосфера.

В результате на этой поверхности образуются локальные области с избытком оксидов — «горки», их хорошо видно на рис. 1.

Основными процессами, происходящими в ядре, будут процессы диффузии:

- 1) Pb, Cd и Se наружу;
- 2) Кислорода и вакансий внутрь ядра.

Таким образом, мы имеем систему из 5 диффундирующих компонентов, 4 из которых независимы (все кроме вакансий). Кристаллическая решетка PbCdSe имеет кубическую структуру, и поэтому коэффициенты диффузии изотропны и независимы от  $r$ . Это позволяет использовать одномерное приближение диффузии. В результате получаем следующие уравнения диффузии через ядро:

$$\frac{\partial C_{Pb}}{\partial t} = -D_{11} \frac{\partial^2 C_{Pb}}{\partial r^2} - D_{12} \frac{\partial^2 C_{Cd}}{\partial r^2} - D_{13} \frac{\partial^2 C_{Se}}{\partial r^2} - D_{14} \frac{\partial^2 C_O}{\partial r^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_{Cd}}{\partial t} = -D_{21} \frac{\partial^2 C_{Pb}}{\partial r^2} - D_{22} \frac{\partial^2 C_{Cd}}{\partial r^2} - D_{23} \frac{\partial^2 C_{Se}}{\partial r^2} - D_{24} \frac{\partial^2 C_O}{\partial r^2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_{Se}}{\partial t} = -D_{31} \frac{\partial^2 C_{Pb}}{\partial r^2} - D_{32} \frac{\partial^2 C_{Cd}}{\partial r^2} - D_{33} \frac{\partial^2 C_{Se}}{\partial r^2} - D_{34} \frac{\partial^2 C_O}{\partial r^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_O}{\partial t} = D_{41} \frac{\partial^2 C_{Pb}}{\partial r^2} + D_{42} \frac{\partial^2 C_{Cd}}{\partial r^2} + D_{43} \frac{\partial^2 C_{Se}}{\partial r^2} + D_{44} \frac{\partial^2 C_O}{\partial r^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_v}{\partial t} = -\frac{\partial C_{Pb}}{\partial t} - \frac{\partial C_{Cd}}{\partial t} - \frac{\partial C_{Se}}{\partial t} - \frac{\partial C_O}{\partial t} \quad (6)$$

Точные значения коэффициентов диффузии можно узнать только эмпирически. К тому же, они будут зависеть от толщины оксидной оболочки и устремляться к нулю при некоторой критической толщине по мере уменьшения интенсивности диффузии. К тому же, коэффициенты диффузии будут зависеть от концентрации вакансий, не образовавших крупные поры, усиливая вакансионный механизм диффузии. В модели используются следующее уравнение:

$$D(h) = D_o \left(1 - \frac{h}{h_{кр.}}\right) (C_v - C_{v \text{ пор.}}) = D_o \left(1 - \frac{\sqrt{b \cdot t}}{h_{кр.}}\right) (C_v - C_{v \text{ пор.}}) \quad (7)$$

Вакансии будут образовываться преимущественно на границе ядро-оболочка. Затем они будут диффундировать вглубь ядра. С ростом концентрации вакансий в ядре они начинают сливаться во все более крупные поры. Этот процесс обусловлен тем, что энергетически выгодно образование крупных пор: так снижается поверхностная энергия системы. В пределе данный процесс должен происходить вплоть до образования одной единственной поры, однако в рассматриваемом случае процесс получения материала высокотемпературный, и с охлаждением системы процесс наноструктурирования прекращается.

В результате система «застывает» на этапе большого числа относительно крупных пор. Данный процесс схож с созреванием Оствальда коллоидных систем. Небольшие скопления вакансий постепенно образуют все более крупные поры, но в какой-то момент появление новых пор останавливается, а новые вакансии лишь увеличивают размер уже существующих, которые при этом все так же могут сливаться.

### Итоги работы

На рис. 3 показана начальная стадия процесса образования пор в зерне халькогенидов свинца. На этом этапе происходит процесс накопления вакансий и постепенного роста оксидной оболочки.

На рис. 4 показана промежуточная стадия моделируемого процесса. Интенсивное сливание уже вакансий началось. Процесс образования оксидной пленки почти завершен, диффузия вакансий и свинца почти прекращается.

На рис. 5 показана заключительная стадия процесса. Рост пленки уже представляет собой лишь «островки», поры организованы в характерную пористую структуру.



Рис. 3. Начальная стадия процесса получения наноструктурированных зерен халькогенида свинца.

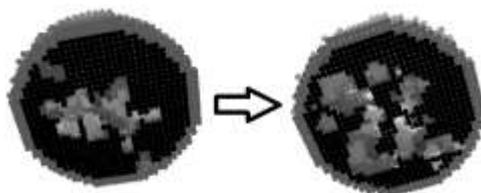


Рис. 4. Промежуточная стадия процесса получения наноструктурированных зерен халькогенида свинца.

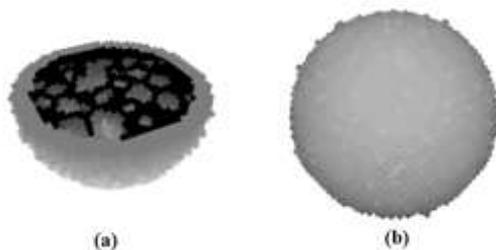


Рис. 5. Последний этап процесса получения наноструктурированных зерен халькогенида свинца.  
(а) — внутреннее ядро зерна, (б) — оксидная оболочка и островковая структура оксида.

### Заключение

С помощью компьютерного моделирования проведены исследования получения и сенсibiliзирующего окисления наноструктурированных слоев халькогенидов свинца, позволившие качественно объяснить наблюдаемые в экспериментах результаты по формированию оксидной оболочки, наноструктурированию внутризеренного пространства, а также развитых пор и оксидных «островков» на оболочке.

### Список литературы

1. Спивак Ю.М., Мошников В.А.. Особенности светочувствительных поликристаллических слоев PbSe с сетчатой структурой. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010, № 4, С. 71–76.
2. Spivak Y., Kononova I., Kononov P., Moshnikov V., Ignat'ev S. The Architectonics Features of Heterostructures for IR Range Detectors Based on Polycrystalline Layers of Lead Chalcogenides. *Crystals* 2021, no. 11 (9), 1143. <https://doi.org/10.3390/cryst11091143>
3. Мараева Е.В., Мошников В.А. Поликристаллические узкозонные материалы с наноструктурированными диэлектрическими прослойками для ик-техники. В книге: Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2017. С. 11-31.. ISBN: 978-5-7629-2362-0
4. Безверхний В.П., Спивак Ю.М.. Моделирование пористых наноматериалов на примере наноструктурированных слоев на основе халькогенидов свинца. Тез. доклада на межд симп. «Нанопизика и Наноматериалы — 2020», 2020, С. 55-60.
5. Безверхний В.П., Спивак Ю.М., Мошников В.А.. Анализ путей улучшения эффективности фотолуминесценции в наноструктурированных слоях халькогенидов свинца за счет варизонности. Тез. доклада на межд. симп. «Нанопизика и наноматериалы — 2021», 2021, С. 33-37.
6. Мараева Е. В. Мошников В.А., Таиров Ю.М. Модели формирования оксидных слоев в наноструктурированных материалах на основе халькогенидов свинца при обработке в парах кислорода и иода // Физика и техника полупроводников. — 2013. — Т. 47. — № 10. — С. 1431-1434.
7. К модели окисления поликристаллических слоев халькогенидов свинца в иодосодержащей среде / Е. В. Мараева, В. А. Мошников, А. А. Петров, Ю. М. Таиров // Физика и техника полупроводников. — 2016. — Т. 50. — № 6. — С. 791-793.
8. Мараева Е.В., Мошников В.А. Физико-химические особенности наноструктурирования интерфейсов зерен поликристаллических фотоприемников на основе халькогенидов свинца, Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 64. С. 146-151
9. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение / Под. ред. Мошникова В.А. Авторы: О. А. Александрова, А. И. Максимов, В. А. Мошников, Д. Б. Чеснокова. — Санкт-Петербург: ООО «Технолит», 2008. — 240 с.

## МЕДЬ- И СЕРЕБРО-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ КАРБЕНИЗИРОВАННОГО МЕЛАМИНОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО ПОЛИМЕРА И ИХ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Я.А. ВИСУРХАНОВА, Е.А. СОБОЛЕВА, М.Е. БЕЙСЕНБЕКОВА

*Институт Органического Синтеза и Углекимики Республики Казахстан,  
г. Караганда, Казахстан*

Аннотация: Медь- и серебро-углеродные композиты синтезированы химическим восстановлением катионов металлов с помощью гидразингидрата в водно-этанольной среде без и с добавлением карбенизированного меламиноформальдегидного полимера. Строение и морфологические особенности синтезированных композитов (МФС + Cu, МФС + Ag и МФС + Ag-Cu) исследованы методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии. Установлено, что наночастицы меди и серебра располагаются на поверхности и в порах меламиноформальдегидной сажи, при этом формируются кристаллиты различной формы. Выполненными экспериментами установлено, что все синтезированные металл-углеродные композиты проявляют электрокаталитическую активность в электрогидрировании ацетофенона и п-нитроанилина, повышая скорость гидрирования и их конверсию по сравнению с электрохимическим восстановлением.

**Ключевые слова:** наночастицы серебра, наночастицы меди, карбенизированные полимеры, электрокаталитическое гидрирование, ацетофенон, п-нитроанилин

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08855930).

Созданию металл-углеродных композитов с целью применения их в качестве катализаторов с наночастицами металлов, нанесёнными на углеродные носители: графен, фуллерены, нановолокна, карбонизированные полимеры и др., уделяется пристальное внимание учёных. Благодаря большой удельной площади поверхности, хорошей устойчивости и высокой электропроводности подобные носители являются не только эффективными подложками, но и стабилизаторами для наночастиц металлов [1].

Целью данной работы является получение металл-углеродных композитов на основе карбонизированного азотсодержащего меламинаформальдегидного полимера (МФ-полимер) и частиц меди, серебра и серебра-меди и изучение их электрокаталитических свойств в электрогидрировании органических соединений.

Моно- и биметалл-углеродные композиты на основе карбонизированного МФ-полимера и частиц меди (МФС + Cu), серебра (МФС + Ag) и серебра-меди (МФС + Ag-Cu) были получены химическим восстановлением катионов металлов в водно-этанольной среде в присутствии меламинаформальдегидной сажи (МФ-сажи). МФ-полимер был синтезирован по реакции поликонденсации меламина с формальдегидом (в соотношении 1:4) по методике, описанной в работе [2]. Затем полученный МФ-полимер был термически обработан при 500°C в течение 2 ч в условиях с ограниченным доступом кислорода. Композиты МФС + Cu, МФС + Ag и МФС + Ag-Cu были получены введением нитратов меди и серебра в водно-этанольную суспензию МФС с последующим восстановлением катионов металлов гидразингидратом с добавлением гидроксида натрия при определённой температуре: 60°C (Cu), 40°C (Ag) или 60°C (для Ag-Cu). При этом соотношение МФС/металлы было выбрано 1:1 и 2:1 по массе.

Фазовые составы полученных медно- и серебро-углеродных композитов на основе карбонизированного МФ-полимера были изучены методом рентгенофазового анализа (РФА) после синтезов и после их применения в электрогидрировании органического соединения. По результатам РФА установлено, что в составе композита МФС + Cu присутствуют, в основном, нульвалентные частицы меди и в небольшом количестве оксид CuO, а также аморфный сажистый углерод. Средние размеры медных частиц составляют ~30 нм. После электрохимического восстановления и применения этого композита в качестве электрокатализатора происходит понижение количества оксидов меди с увеличением содержания медных фаз в результате электрохимического восстановления катионов меди из её оксида. В композите МФС + Ag присутствуют кристаллические фазы восстановленного серебра и в малом количестве аморфный углерод. Средние размеры серебряных частиц составляют ~20 нм. В составе биметаллического композита МФС + Ag-Cu содержатся кристаллические фазы меди и серебра, восстановленных гидразингидратом в присутствии МФ-сажи. При этом интенсивность дифракционных пиков, соответствующих кристаллическим фазам серебра, заметно выше, чем меди.

Морфологические особенности медно- и серебро-углеродных композитов были изучены методом электронной микроскопии на растровом сканирующем электронном микроскопе.

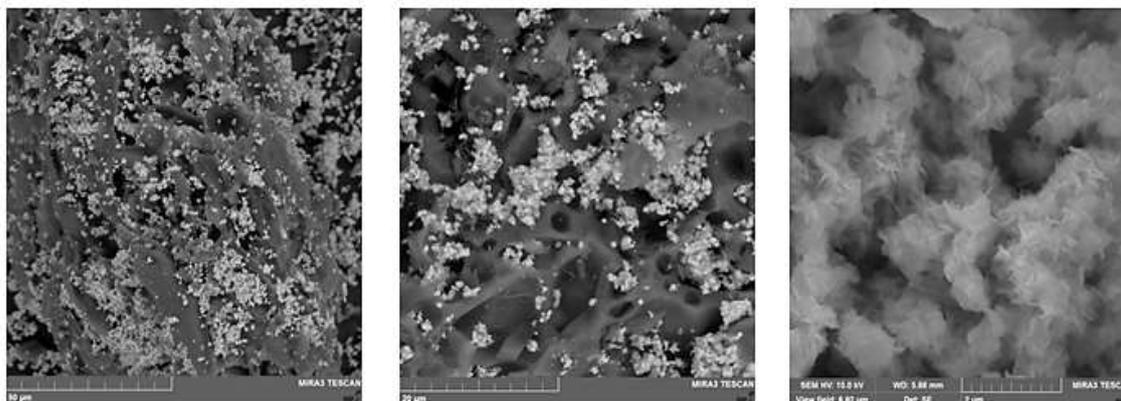


Рис. 1. Микроснимки композита МФС(1) + Cu(1) после синтеза.

Согласно микроскопическим исследованиям композита МФС + Cu (рис. 1), частицы меди распределены сравнительно густо по поверхности довольно крупных сажистых образований из МФ-полимера, сохраняющих его форму. При этом частицы меди в виде пластинок собраны в агломераты для формирования, по-видимому, более крупных кристаллических структур.

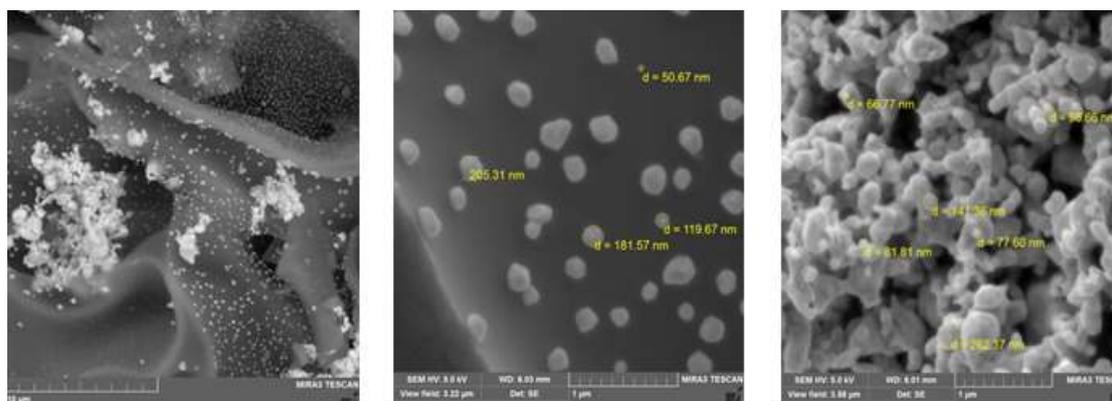


Рис. 2. Микроснимки композита МФС(1) + Ag(1) после синтеза.

Согласно микроснимкам на рис. 2, в композите МФС + Ag после синтеза имеются укрупненные кристаллиты серебра двух видов: одни располагаются непосредственно на поверхности карбонизированного полимера с удалением друг от друга и имеют округлые и другие кристаллические формы, их размеры изменяются в пределах 50-220 нм.

Возможно, их взаимодействие с МФ-сажей осуществляется через атомы азота в структуре продуктов карбонизации МФ-полимера. Другие находятся в порах МФ-сажи и представляют собой скопление связанных между собой округлых или вытянутых гранул, объединенных в короткие цепочки. В композите МФС + Ag-Cu на поверхности МФ-сажи образуются кристаллиты, состоящие почти полностью из серебра, или из меди, а также кристаллиты с совместным присутствием обоих металлов.

Синтезированные медно- и серебро-углеродные композиты на основе МФ-сажи были изучены на проявление электрокаталитической активности в электрогидрировании двух органических соединений: ацетофенона (АФ) —  $C_6H_5-CO-CH_3$  и *n*-нитроанилина (*n*-НА) —  $n-NO_2-C_6H_4-NH_2$ . Основными продуктами электрокаталитического

гидрирования ацетофенона является метилфенилкарбинол (МФК), *n*-нитроанилина — *n*-фенилендиамин, которые имеют широкий спектр практического применения. Эксперименты были выполнены в диафрагменной электрохимической ячейке в спиртоводно-щелочном католите, в которой анодом служила платиновая сетка. Композиты массой 1,0 г наносили на поверхность горизонтально расположенного медного катода без закрепления. Начальная концентрация АФ составляла 0,198 моль/л, *n*-НА — 0,066 моль/л.

Сравнение полученных результатов выполнено с данными по электрохимическому восстановлению АФ и *n*-НА на медном катоде в аналогичных условиях. Электрохимическое восстановление АФ на Cu-катоде (без катализатора) проходит со скоростью 2,0 мл H<sub>2</sub>/мин и со степенью превращения 28,1%. А *n*-НА электрохимически восстанавливается на Cu-катоде со скоростью 6,9 мл H<sub>2</sub>/мин и конверсией исходного соединения 83,1% и образованием *n*-ФДА (57,8%). Однако в продуктах их восстановления *n*-НА побочные продукты. Установлено, что почти все исследованные медь- и серебро-углеродные композиты проявили электрокаталитическую активность в электро-гидрировании органических соединений. Так, скорость гидрирования АФ на композитах МФС + Cu изменяется в пределах 6,6-8,2 мл H<sub>2</sub>/мин, а его конверсия достигает 98,0%. Электрокаталитическое гидрирование *n*-НА с применением композитов МФС + Ag и МФС + Ag-Cu проходит также с высокими скоростями (8,6-9,8 мл H<sub>2</sub>/мин) и степенью превращения *n*-НА 95,4-100%. Возрастают и выходы основных продуктов гидрирования — МФК и *n*-ФДА — при резком снижении образования побочных продуктов.

Электрокаталитическое гидрирование АФ на медных частицах без МФС и с большим содержанием металла в аналогичных условиях проходит со скоростью 7,3 мл H<sub>2</sub>/мин, конверсия АФ составляет 97,2 %. Гидрирование *n*-НА с применением частиц серебра и серебра-меди (без МФ-сажи) осуществляется также с высокими скоростями: 10,0 и 9,0 мл H<sub>2</sub>/мин, соответственно.

### Список литературы

1. Gopiraman M., Soo Kim I. Carbon Nanocomposites: Preparation and Its Application in Catalytic Organic Transformations // In Book «Nanocomposites — Recent Evolutions». — London: IntechOpen, 2019. — 230 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81109>
2. Visurkhanova Ya.A., Ivanova N.M., Tusupbekova G.K., Izbastanova D.S. Synthesis and the characteristic melamine formaldehyde composites // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 1040. — P. 393-398. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.393>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ И ОКСИДА НИКЕЛЯ МЕТОДОМ РФЭС

А.Ю. ГАГАРИНА<sup>1</sup>, К. ХАЛУГАРОВА<sup>1</sup>, З.В. ШОМАХОВ<sup>2</sup>, Ю.М. СПИВАК<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

**Аннотация.** В данной работе методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии исследуются композиционные материалы на основе пористого кремния и частицами оксида никеля, полученные методом совместного синтеза.

**Ключевые слова:** пористые материалы, пористый кремний, оксид никеля, РФЭС

### Введение

Для создания новых приборов с улучшенными характеристиками для сенсорики, катализа и альтернативной энергетики большой интерес представляют композиционные материалы на основе пористых матриц с инкорпорированными частицами. Варьирование технологических параметров используемых синтезов для получения таких веществ дает возможность получения широкого диапазона определенных характеристик конечных материалов.

Одним из подходящих материалов для пористой матрицы является пористый кремний. Пористый кремний обладает большой площадью поверхности, а метод электрохимического травления, применяемый для его получения, позволяет получать пористые развитые структуры с диаметром пор от нм до мкм. Таким образом можно создать подходящую структуру для инкорпорирования частиц разных размеров для получения новых композиций.

Согласно исследованиям [1, 2] оксид никеля сносит изменения в свойства пористого кремния, в том числе оптические. Данные структуры NiO-porSi показывают лучшую чувствительность для газов в газовых датчиках на основе таких структур. Таким образом, целью работы являлось изучение возможности применения метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии для исследования систем NiO-porSi, полученные совместным синтезом.

### Методика получения образцов

#### *Пористый кремний*

Пористый кремний получали методом электрохимического травления монокристаллического кремния с ориентацией (111) и n-типом электропроводности [3-5]. В качестве электролита использовалась плавиковая кислота, разбавленная водой. Полученные пористые матрицы промывались в спирте для очищения остатков электролита.

#### *Композиция NiO-porSi*

Для получения композиций NiO-porSi применялся метод получения NiO химическим осаждением в присутствии подложки. Для синтеза использовались растворы гексагидрата хлорида никеля ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и гидроксида натрия (NaOH) [6].

Подложка пористого кремния предварительно замачивалась в растворе NiCl в течение двух суток. К раствору с подложкой покапельно добавлялся раствор гидроксида натрия и перемешивался с помощью магнитной мешалки. Далее подложка сушилась на воздухе

в течение двух дней при комнатной температуре и затем отжигалась в муфельной печи в течение 3 часов при 500°C.

Таким образом были получены несколько образцов NiO-porSi: с добавлением небольшого количества спирта в синтезе (образец 1) и с использованием воды (образец 2).

### Метод исследования

В данной работе полученные образцы исследовались методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Метод РФЭС широко используется для химического анализа поверхности образцов. Применяется для детектирования загрязнений и анализа присутствия определенных веществ на поверхности, а также для контроля процессов, протекающих от объема к поверхности и наоборот. Суть метода заключается в измерении энергии фотоэлектронов, выбитых с различных энергетических уровней атомов при облучении вещества рентгеновским излучением [7].

### Результаты исследования

На рисунках 1 и 2 представлены обзорные спектры РФЭС для двух образцов.

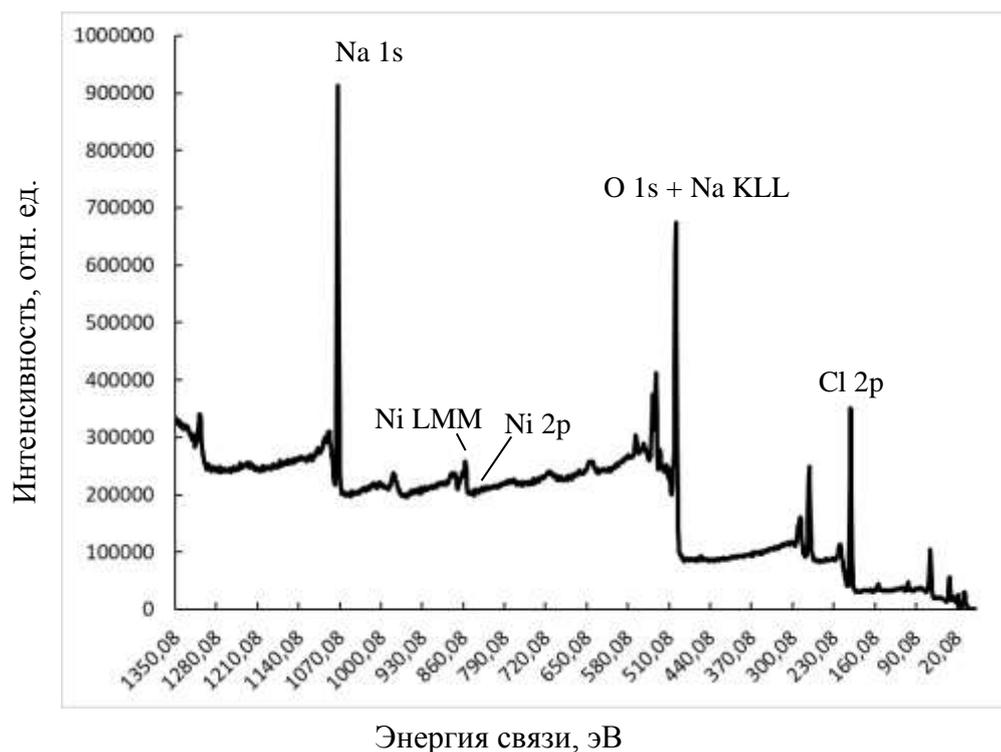


Рис. 1. Обзорный спектр РФЭС для композиции NiO-porSi с добавлением спирта при синтезе.

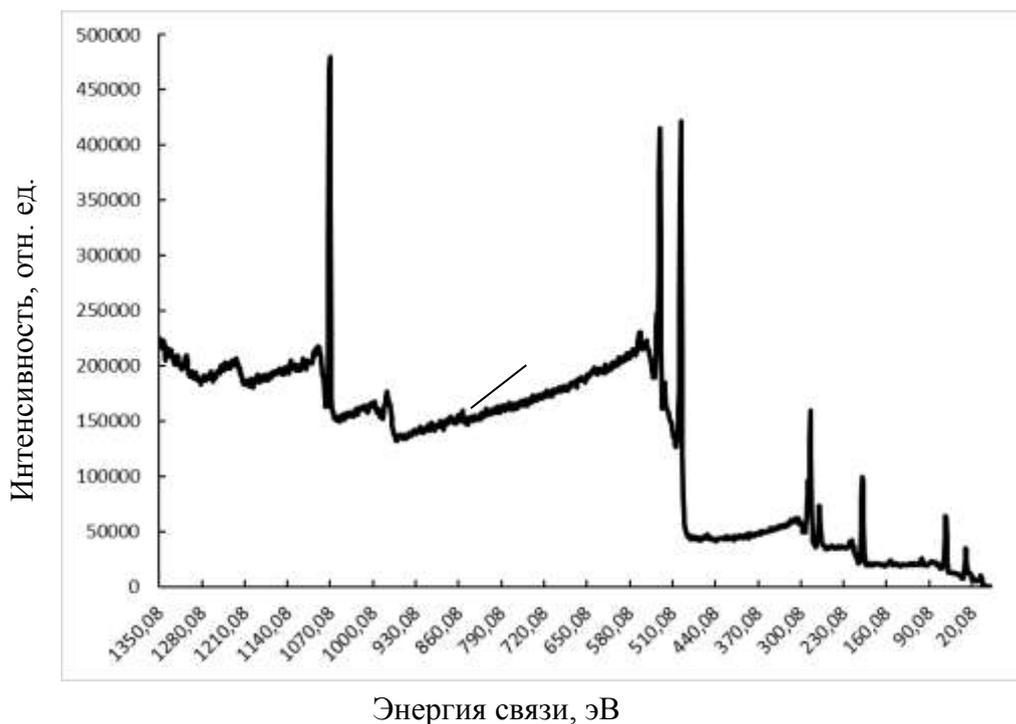


Рис. 2. Обзорный спектр РФЭС для композиции NiO-porSi с использованием воды при синтезе.

Из обзорных спектров видно, что на поверхности имеется наличие образовавшегося никеля Ni 2p (856 эВ) и Ni LMM (843 эВ, рис. 1). Из спектра на рис. 1 можно увидеть, что на поверхности образца присутствуют остатки компонентов реакции Cl 2p (202 эВ), Na 1s (1074 эВ), O 1s (533 эВ) с перекрывающейся областью Na KLL. Пик O 1s с энергией 533 эВ на обоих спектрах говорит о наличии гидроксида металла на поверхности [8], что указывает на частично не до конца пройденную реакцию образования оксида никеля нагревом при высоких температурах гидроксида никеля, полученного при синтезе. Присутствие натрия и хлора также указывают на остатки продуктов реакции NaCl, от которого можно избавиться путём тщательной промывки образцов перед отжигом. Так как в реакции синтеза не участвовали углеродсодержащие вещества, можно предположить, что пик C 1s (284 эВ) на рис. 2 связан с углеродным загрязнением, так как большинство образцов, подвергшихся воздействию атмосферы, будут иметь поддающееся обнаружению количество случайного углеродного загрязнения.

### Заключение

Исследование полученных совместным синтезом композиций NiO-porSi методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показало, что на поверхности образцов присутствуют как фазы синтезированного никеля, так и фазы загрязнений и фазы продуктов реакции. Перспективным направлением дальнейшего изучения образцов являются исследования структуры пор на наличие фаз NiO внутри пористой структуры.

### Список литературы

1. M'hammedi K. et al. Macroporous Silicon (MPS) with Embedded NiO Thin Film for CO<sub>2</sub> Gas Sensing //Arabian Journal for Science and Engineering. — 2019. — Т. 44. — №. 1. — С. 521-529.
2. Salih E. Y. et al. Rapid fabrication of NiO/porous Si film for ultra-violet photodetector: The effect of laser energy //Microelectronic Engineering. — 2022. — Т. 258. — С. 111758.

3. Афанасьев А. В. и др. Синтез нано-и микропористых структур электрохимическими методами. // Биотехносфера. — 2011. — №. 1-2 (13-14).
4. Spivak Y. M. et al. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions // Journal of Nanomaterials. — 2016. — Т. 2016.
5. Soboleva E. et al. Properties of porous silicon precipitated with nickel for gas sensors // Sensor Letters. — 2018. — Т. 16. — №. 9. — С. 672-676.
6. Rahal H. T. et al. Synthesis, characterization, and magnetic properties of pure and EDTA-capped NiO nanosized particles // Journal of Nanomaterials. — 2017. — Т. 2017.
7. Bagus, Paul S., Eugene S. Iltan, and Connie J. Nelin. «The interpretation of XPS spectra: Insights into materials properties.» Surface Science Reports 68.2 (2013): 273-304.
8. Nohira, Hiroshi, et al. «Characterization of ALCVD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> layer using X-ray photoelectron spectroscopy.» Journal of non-crystalline solids 303.1 (2002): 83-87.

## БИОСЕНСОР ГЛЮКОЗЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

К.А. ГАНИЧКИНА, Н.В. ЛАТУХИНА, О.А. ЛЬВОВА, Н.П. КОЗЛОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. С.П.Королева*

**Аннотация.** Было проведено исследование поверхностей, сколов и порошков образцов пористого кремния и нанокompозитов ПК+глюкоза, ПК+слеза натуральная, ПК+NaCl методами оптической и электронной микроскопии. Были изучены электрические свойства нанокompозитов, а также состав и морфология образцов гравиметрическим методом, методами измерения ВАХ и фотопроводимости.

**Ключевые слова:** биосенсор, ПК, глюкоза.

Одним из перспективных наноматериалов биомедицинского направления для разнообразных применений является пористый кремний, который представляет собой систему нанокристаллов различных размеров и формы, а также нанокompозиты пористого кремния с различными биологическими и неорганическими веществами.

Актуальность таких исследований определяется проблемой создания эффективного, компактного и экономичного неинвазивного глюкометра. Поскольку содержание сахара в крови влияет на состав всех физиологических жидкостей организма (слез, слюны, пота и т.д.), существует множество возможных принципов действия таких приборов, основанных на анализе состава любой из этих жидкостей. В работах [1-3] проводилось исследование влияния на оптические и электрические свойства пористого кремния растворов глюкозы в воде и слезной жидкости.

Образцы пористого кремния изготавливались методом электрохимического травления во фторсодержащих растворах. Использовались пластины монокристаллического кремния с разной обработкой поверхности—текстурированной, полированной и более грубой шлифованной. Травление происходило при токах 60 мА, 80 мА и длилось в течение 15, 20 и 30 минут. Пористость рассчитывалась гравиметрическим методом по убыли веса образца после травления и составила от 17% до 43%. Были изготовлены водные растворы с содержанием 3%, 6% и 12% глюкозы и 9% NaCl. Для электрических измерений на сторону с пористым слоем наносились пастовые контакты в виде дискретных кругов диаметром 1 — 1,5 мм. Исследование ИК-спектров проводилось на Фурье-спектрометре ФСМ 2201 с помощью приставки диффузного отражения[4-5].

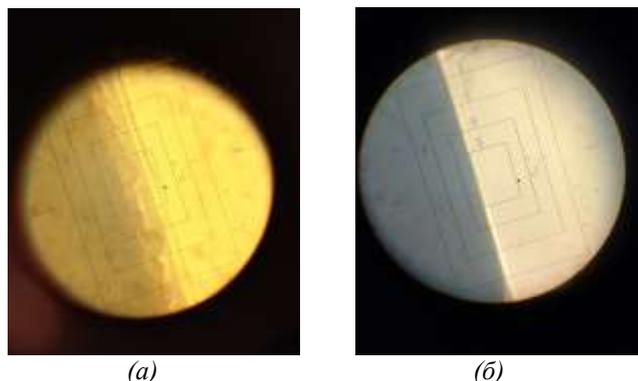


Рис. 1. (а) Скол шлифованной пластинки. (б) Скол полированной пластинки.

**Для шлифованной пластинки(толщина 230 микрон):**

*Травленная сторона*

$\rho=1,98 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (удельное сопротивление)

$R_s=86,6 \text{ Ом}/\text{Г}$  (поверхностное сопротивление)

*Нетравленная часть:*

$\rho=1,88 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (удельное сопротивление)

$R_s=81,9 \text{ Ом}/\text{Г}$  (поверхностное сопротивление)

*Обратная сторона:*

$\rho=1,93 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (удельное сопротивление)

$R_s=84,3 \text{ Ом}/\text{Г}$  (поверхностное сопротивление)

**Для полированной пластинки(толщина 350 микрон):**

*Травленная сторона*

$\rho=8,24 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (удельное сопротивление)

$R_s=236 \text{ Ом}/\text{Г}$  (поверхностное сопротивление)

*Нетравленная часть:*

$\rho=8,22 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  (удельное сопротивление)

$R_s=236 \text{ Ом}/\text{Г}$  (поверхностное сопротивление)

Для измерений спектров были выбраны пластинки Р — образец с пористым слоем на текстурированной поверхности, L — на полированной поверхности, R — на шлифованной поверхности, на которые наносились растворы с разной концентрацией глюкозы (Рис. 2 — 4).

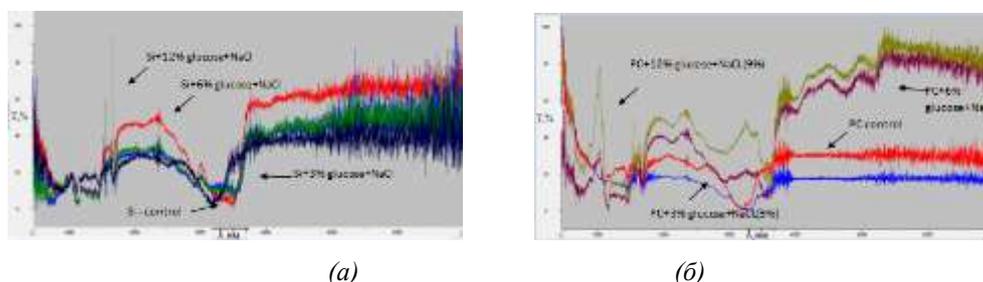


Рис. 2. (а) ИК — спектры для Р-пластинки кремния с текстурированной поверхностью  
(б) ИК — спектры для Р-пластинки пористого кремния с текстурированной поверхностью

По рисункам видно, что благодаря наличию глюкозы и NaCl возникают новые полосы пропускания. Чем больше концентрация глюкозы, тем больше возникают новые пики. Отчетливо заметно появление на 4000 нм, 4700 нм, и на 3200 нм.

Для кремния возникновение новых полос на 3050 нм и 3500 нм.

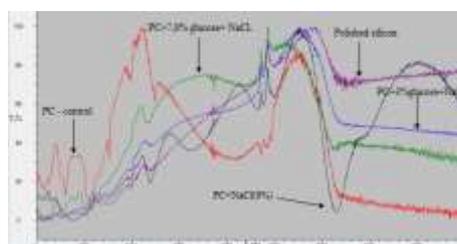


Рис. 3. ИК спектры полированной пластинки L с растворами.

Для шлифованной пластинки:

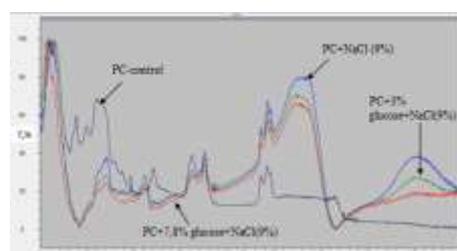


Рис.4. ИК спектры шлифованной пластинки R с растворами.

Из рис. 2 (а, б) видно, что определенные полосы поглощения отвечают за кремний, а некоторые полосы за присутствие глюкозы в порах образцов. Особенно отчетливо видны полосы поглощения пористого кремния: пик 2100 нм, 2950 нм. Полосы, отвечающие за наличие глюкозы можно наблюдать на 1600 нм, 3252 нм.

Однако количественную оценку содержания глюкозы в растворе по ИК-спектрам сделать сложно, явной зависимости коэффициента пропускания от содержания глюкозы в растворе не прослеживается.

Проведенные ранее исследования влияния внедренной в поры глюкозы на электрические свойства пористого кремния показали явно прослеживаемую зависимость электрического сопротивления от содержания глюкозы в наносимых на пористый слой растворах [1]. Исследования проводились с растворами от 1% до 12% глюкозы в воде и в слезной жидкости и показали уменьшение сопротивления слоя при увеличении содержания глюкозы в растворе. Эти результаты подтверждаются проведенными в данной работе исследованиями с образцами пористого кремния с нанесенными водными растворами глюкозы и хлорида натрия. При изменении содержания глюкозы в растворе от 3% до 7,8% удельное сопротивление уменьшилось от  $173,6 \pm 59$  кОм·м до  $15,75 \pm 2$  кОм·м. Удельное сопротивление пористого слоя с нанесенным физраствором без глюкозы составило  $55,9 \pm 1,27$  кОм·м, удельное сопротивление исходного пористого слоя  $158 \pm 12,7$  кОм·м.

Таким образом, проведенные исследования показывают заметное влияние внедренной в поры глюкозы как на оптические, так и на электрические свойства пористого кремния. Для количественной оценки содержания глюкозы в физиологических жидкостях, видимо, более перспективны методы, основанные на измерении электрических параметров пористого слоя. Возможно, при совершенствовании методики оптических измерений или применении комбинированных измерений ситуация изменится.

### Список литературы

1. Ganichkina K.A., Latukhina N.V. *Electrical properties of porous silicon as a biosensor material* // Journal of Biomedical Photonics and Engineering 2020. — Vol. 6. Issue 1. — P. 1-7
2. Ganichkina K.A., Latukhina Natalya Vilenovna *Infrared spectroscopy of porous silicon for biosensorics* // The International Symposium and International School for Young Scientists on «Physics, Engineering and Technologies for BioMedicine». — 2020. — P. 93-95
3. Ganichkina K.A., Suyundukova D.R., Latukhina N.V. *IR spectra of porous silicon based nanocomposites* // Journal of Biomedical Photonics and Engineering, 2019. — Vol. 5. № 2.
4. Zairi S. et al. Porous silicon a transducer material for a high-sensitive (bio) chemical sensor: effect of a porosity, pores morphologies and a large surface area on a sensitivity //Thin Solid Films. — 2001. — Т. 383. — №. 1-2. — С. 325-327
5. Смит А., Тарасевич Б. Н. Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналитическое применение: Пер. с англ. — Мир, 1982.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОКСИДНЫХ НАНОСТРУКТУР

К.В. ГЕРАСИМОВА<sup>1</sup>, А.М. ГУКЕТЛОВ<sup>2</sup>, З.В. ШОМАХОВ<sup>2</sup>, С.С. НАЛИМОВА<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х.М. Бербекова

**Аннотация.** В настоящее время интерес представляет разработка новых газочувствительных наноструктурированных материалов на основе композиционных оксидов металлов, обладающих улучшенными функциональными характеристиками. В работе гидротермальным методом были получены наноструктуры оксида цинка. Иерархические наноструктуры Zn-Fe-O были получены погружением слоев оксида цинка в водный раствор сульфата железа с последующим отжигом при 500°C. Проанализирована чувствительность образцов ZnO и Zn-Fe-O к парам изопропилового спирта. Выявлена оптимальная концентрация сульфата железа в растворе, при которой достигается максимальная чувствительность образцов.

**Ключевые слова:** газовые сенсоры, композитные оксидные наноструктуры, нанокompозиты, сенсорные свойства, гидротермальный метод, наностержни

Газочувствительные наноструктуры на основе композитных оксидных материалов используются для производства газовых сенсоров. Такие приборы предназначены для обнаружения ядовитых, токсичных, взрывоопасных и других газов, опасных для человека. Чувствительность таких структур зависит от материала, из которого они изготовлены (к примеру — оксид цинка [1]). Сенсорные характеристики устройств на основе ZnO в некоторых случаях недостаточны для их практического применения, поэтому необходимо найти иное решение. Из недавних публикаций стало известно о лучших сенсорных свойствах полупроводниковых оксидных нанокompозитов (ZnO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [2,3].

Газочувствительные слои формировались на керамической подложке с NiCr/Ni/Au электродами (ширина электрода и межэлектродного пространства одинакова — 25 мкм). Наностержни оксида цинка получены гидротермальным методом [4-6]. Для формирования слоев системы Zn-Fe-O наностержни ZnO были помещены в водный раствор сульфата железа на 30 минут, структура обжигалась при T = при 500 °C. Проанализированы микроструктура и элементный состав полученных иерархических структур системы Zn-Fe-O.

Проведена сравнительная характеристика сенсорных свойств структур на основе оксида цинка и иерархических композитных структур. Исследование газочувствительных свойств было проведено под воздействием паров изопропилового спирта (концентрация 1000 ppm) на нагретые до температуры 250°C образцы. Чувствительность рассчитывалась как:

$$S = \frac{R_a - R_g}{R_g} \quad (1)$$

где  $R_a$  — сопротивление на воздухе, а  $R_g$  — сопротивление в присутствии газа-реагента.

Полученные зависимости изменения сопротивления оксида цинка и иерархической структуры, обладающей максимальной чувствительностью при циклическом воздействии воздуха и паров изопропилового спирта для исследования временного отклика полученных структур представлены на рис. 1 и 2.

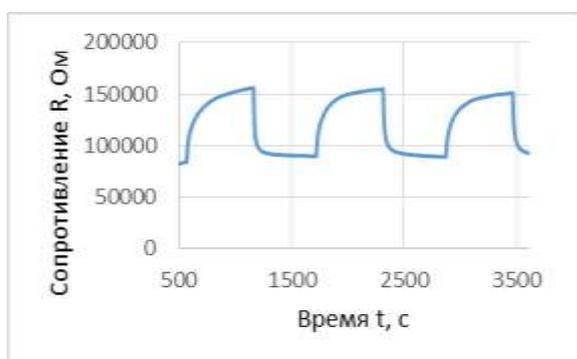


Рис.1. Чувствительность образца ZnO к парам изопропилового спирта.

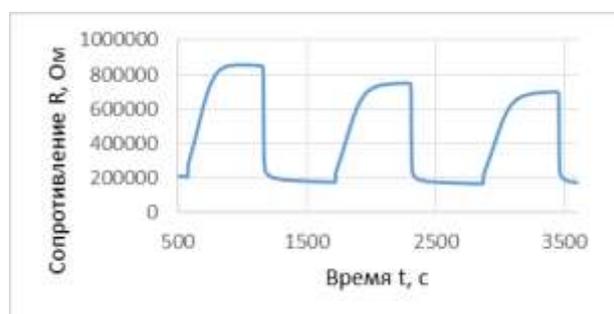


Рис.2. Чувствительность образца ZnO, модифицированного раствором, содержащим Fe<sup>2+</sup> с концентрацией 0,05 моль/л, к парам изопропилового спирта.

В таблице 1 приведены значения чувствительности для трех образцов, модифицированных растворами с разной концентрацией железа и образца с чувствительным слоем ZnO, рассчитанные по формуле (1).

Таблица 1

#### Чувствительность исследованных образцов

Образец	S(изопропиловый спирт)
ZnO	0,73
ZnO+Fe(0,5 моль/л)	3,40
ZnO+Fe(1 моль/л)	3,36
ZnO+Fe(2 моль/л)	0,27

Таким образом, в работе экспериментально определена оптимальная концентрация сульфата железа для получения иерархических структур системы Zn-Fe-O, обладающих улучшенными сенсорными характеристиками.

#### Список литературы

1. 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. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy. Bulgarian Chemical Communications. 2017. Т. 49. № 1. С. 121-126.

2. Карпова С.С., Мошников В.А., Мякин С.В., Коловангина Е.С. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 3. С. 369-372.
3. Налимова С.С., Мошников В.А., Максимов А.И., Мякин С.В., Казанцева Н.Е. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> на их газочувствительность по отношению к парам этанола. Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 8. С. 1022-1026.
4. 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. В сборнике: 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018. Proceedings. 2018. С. 219-221.
5. Nalimova S.S., Maximov A.A., Moshnikov V.A., Bobkov A.A., Mazing D.S., Ryabko A.A., Levkevich E.A., Semenova A.A. Synthesis and study of zinc oxide layers sensitized by colloidal nanocrystals. В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2019. 2019. С. 223-225.
6. Шомахов З.В., Мошников В.А., Бобков А.А., Рябко А.А., Калажоков З.Х. Исследование формирования слоев станната цинка методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 7. С. 1132-1135.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОБРАЗЦАХ P-N SiC ОТ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ

Р.А. ДВОЕГЛАЗОВ, А.В. СОЛОМНИКОВА, В.И. ЗУБКОВ

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

**Аннотация.** Проведена работа по исследованию влияния величины дозы облучения электронами на концентрацию основных носителей заряда. Измерения проводились для набора из 4-х p-n SiC диодов Шоттки с различными дозами облучения электронами. Для каждого образца были измерены вольт-фарадные характеристики для ряда частот тестового сигнала, далее рассчитывались профили концентрации основных носителей заряда. Замечено, что концентрация основных носителей заряда уменьшается с увеличением дозы облучения электронами.

**Ключевые слова:** вольт-фарадная характеристика, облучение электронами, широкозонный полупроводник, карбид кремния

Особое внимание сейчас уделяется такому широкозонному полупроводнику, как карбид кремния. Этот материал активно используется для создания широкого круга приборов электроники, в том числе микроустройств, способных выдерживать агрессивные условия окружающей среды. Более того, развитие атомной промышленности, ядерной энергетики и космической техники невозможно представить без радиационно стойких материалов и электронного оборудования, способных работать в условиях воздействия различного рода облучения [1].

**Целью данной работы** является изучение влияния облучения электронами на концентрацию носителей заряда в структурах p-n SiC.

В ходе работы было исследовано четыре образца p-n диодов 4H-SiC; p-область структуры была получена путём имплантации атомов бора в подложку n-типа, после чего был проведён отжиг [2]. Далее образцы облучались электронами с энергией 0.9 МэВ, дозы облучения указаны в табл. 1. Исследования проводились на комплексе спектроскопии адмиттанса, состоящем из криогенной зондовой станции Janis CCR-10, измерителя температуры LakeShore 336, и измерителя иммитанса Agilent E4980A.

Данный измерительный комплекс является уникальным в России, поскольку реализует измерения методами спектроскопии адмиттанса в широком диапазоне температур  $T=25...450$  К, напряжений  $U=\pm 40$  В и частот тестового сигнала  $f=20$  Гц...2 МГц. В комплексе реализовано автоматизированное управление параметрами эксперимента при помощи программного обеспечения LabVIEW. Для получения профилей концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) был снят набор вольт-фарадных характеристик (ВФХ) при комнатной температуре в диапазоне частот тестового сигнала  $f=10...2000$  кГц.

В случае неоднородно легированного полупроводника дифференцирование вольт-фарадной зависимости по напряжению приводит к выражению для профиля концентрации носителей заряда [3, с. 29]:

$$n(x) = \frac{C^3}{e \varepsilon_0 \varepsilon S^2} \left( \frac{dC}{dV} \right)^{-1} \quad (1)$$

При этом ширина области объёмного заряда (ООЗ) вводится по аналогии с плоским конденсатором [3, с. 29]:

$$x = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C}$$

Полученные в ходе работы ВФХ перестраивались в координатах Мотта-Шоттки (зависимость обратного квадрата ёмкости  $1/C^2$  от прикладываемого напряжения  $U$ ).

Далее рассчитывались соответствующие им профили концентрации ОНЗ. Ниже приведены зависимости, полученные при температуре образца  $T=130$  К (рис. 1-6). Образцы пронумерованы от 1 до 4 по мере роста дозы облучения (дозы облучения приведены в табл. 1).

Графики для образцов 1 и 2 визуально неотличимы, потому в работе приведены зависимости только для первого образца.

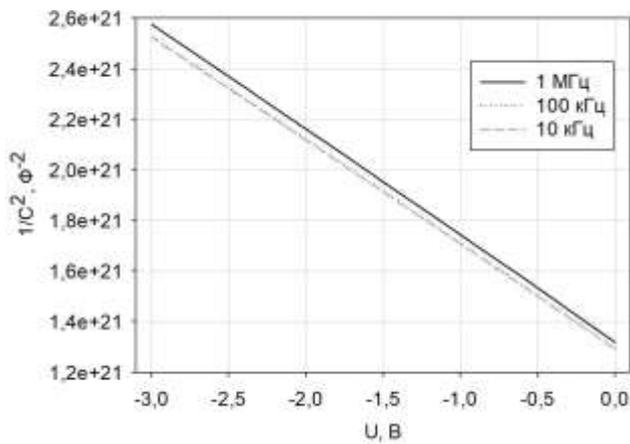


Рис. 1. ВФХ образца №1.

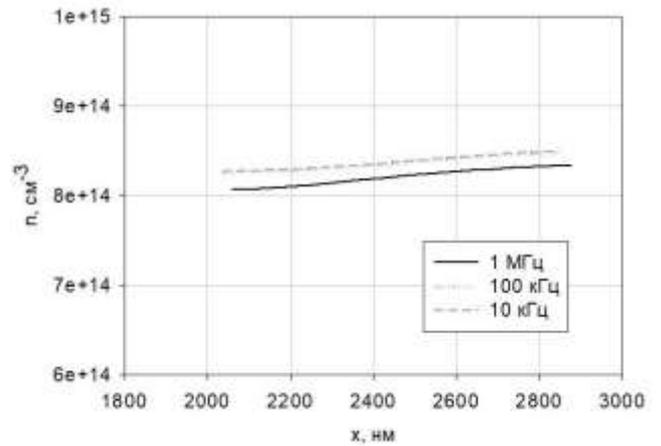


Рис. 2. Профиль концентрации ОНЗ образца №1 на частоте 50 кГц.

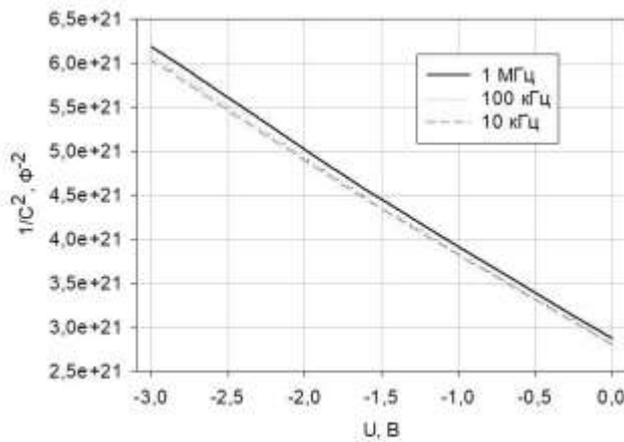


Рис. 3. ВФХ образца №3.

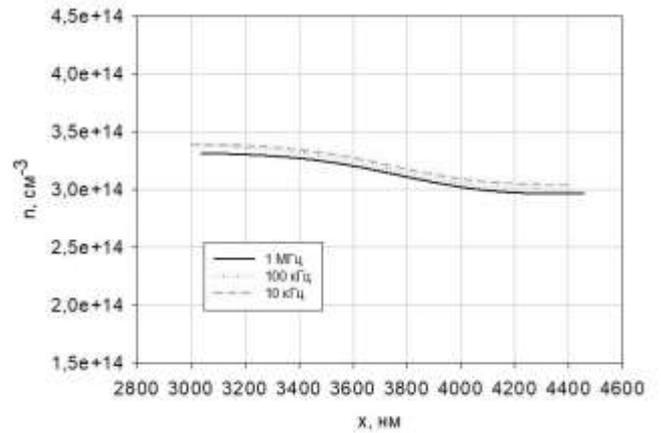


Рис. 4. Профиль концентрации ОНЗ образца №3 на частоте 50 кГц.

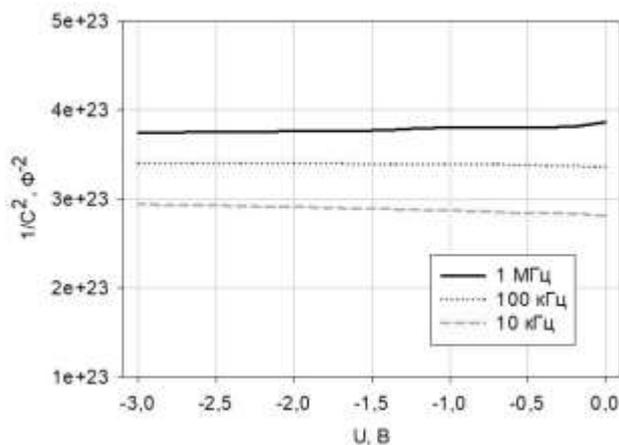


Рис. 5. ВФХ образца № 4.

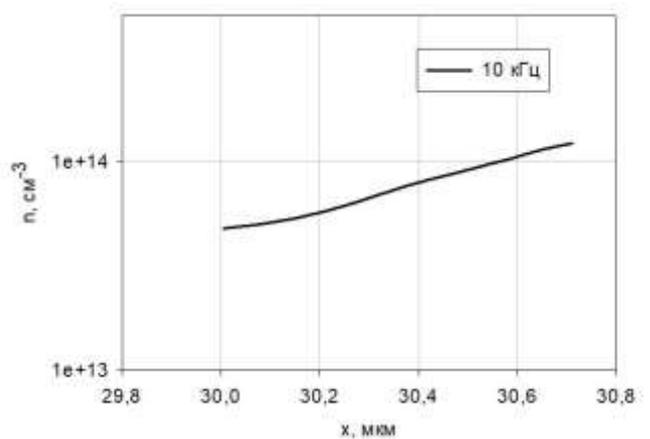


Рис. 6. Профиль концентрации ОНЗ образца № 4 на частоте 10 кГц.

Анализ получаемых C-V характеристик карбида кремния демонстрирует наличие принципиальных особенностей при проведении измерений в этом материале. При дозах облучения ниже  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  зависимости  $1/C^2-V$  на разных частотах (рис. 1 и 3) близки друг к другу (имеет место быть слабая частотная дисперсия), рассчитанная по ним концентрация оказывается одинаковой в пределах экспериментальной погрешности (рис. 2 и 4). Для сильно облучённого образца 4 наблюдается большая частотная дисперсия, частота среза  $f_c$  (частота, при которой ВФХ меняет классический отрицательный наклон на положительный) составляет примерно 100 кГц. При частотах выше  $f_c$  вычислять концентрацию по формуле 1 нельзя [4].

В табл. 1 приведены средние концентрации ОНЗ  $n$  и соответствующие значения ширины области объемного заряда  $x$ , зарегистрированные на частоте 10 кГц.

Таблица 1

### Характеристики образцов

	Номер образца			
	1	2	3	4
Доза облучения $D$ , $\text{см}^{-2}$	Необлучённый	$0,75 \times 10^{14}$	$1,5 \times 10^{14}$	$3,0 \times 10^{14}$
Средняя концентрация ОНЗ $n$ , $\text{см}^{-3}$ (10 кГц)	$8,38 \times 10^{14}$	$6,86 \times 10^{14}$	$3,21 \times 10^{14}$	$0,84 \times 10^{14}$
Ширина ООЗ $x$ , мкм (10 кГц)	2,5	2,7	3,7	30,5

Таким образом, полученные данные позволяют судить о следующем:

1) Концентрация свободных носителей заряда уменьшается при увеличении дозы облучения  $D$ . Эта закономерность объясняется образованием дефектов (вакансий) [1].

2) Сильнолегированный материал демонстрирует кардинальное изменение ВФХ. Причиной этого является резкое увеличение сопротивления за счет компенсации материала [4]. Этот эффект наблюдается при дозе облучения  $D > 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

### Список литературы

1. Влияние облучения на свойства SiC и приборы на его основе / Е.В. Калинина // Физика и техника полупроводников. 2007, т. 41, вып. 7., с. 769-805
2. Влияние облучения электронами высокой энергии на характеристики ударных токов высоковольтных интегрированных 4H-SiC р-п-диодов Шоттки / А.А. Лебедев, В.В. Козловский, П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, А.В. Зубов // Физика и техника полупроводников. 2019, том 53, вып. 10. с. 1448-1452
3. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. Санкт-Петербург: Изд-во «Элмор», 2007. 220 с
4. D.S. Frolov, V.I. Zubkov. Frequency dispersion of capacitance-voltage characteristics in wide bandgap semiconductor-electrolyte junctions // Semiconductor Science and Technology. — 2016. — Vol. 31. № 12.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЁНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ С ДОБАВЛЕНИЕМ ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub>

Д.Ю. Дичковский, У.А. Кузьмина, И.А. Ламкин

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

**Аннотация.** Статья посвящена созданию и исследованию тонких пленок кристаллической структуры перовскит и эффектов возникающих, при добавлении слоя фуллерена C<sub>60</sub>. Перовскит (FAPbI<sub>3</sub>)<sub>0.8</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>0.2</sub> был получен одноэтапным методом. Приведены спектры фотолюминесценции до и после добавления слоя C<sub>60</sub> на структуру, полученную при нанесении 200 мкл перовскита и скорости вращения подложки 5000 об/мин.

**Ключевые слова:** перовскит, тонкая пленка, фуллерен.

**Актуальность исследований** в области создания и эксплуатации тонкопленочных структур перовскит обусловлена тем, что в современных условиях конкурентной борьбы в сфере возобновляемых источников энергии, данные структуры являются главным направлением замещения доминирующего материала — кремния.

На данном этапе развития направления особое внимание уделяется фуллерен-содержащим структурам, так как они отличаются повышенной стабильностью, временем жизни, равномерностью и КПД.

Исследуемая кристаллическая структура (FAPbI<sub>3</sub>)<sub>0.8</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>0.2</sub> привлекательна тем, что сочетает в себе стабильность MAPbBr<sub>3</sub> и широкий спектр поглощения, а также температуроустойчивость FAPbI<sub>3</sub>.

Таким образом, исследование данной структуры позволяет уточнить предпочтительные условия создания для более точной настройки технологического процесса производства конечного продукта — солнечного элемента и повышения его эффективности и стабильности [1].

В ходе исследования были получены тонкие пленки кристаллической структуры перовскит (FAPbI<sub>3</sub>)<sub>0.8</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>0.2</sub> одноэтапным методом. Заранее подготовленный раствор из реагентов определенных масс и растворителя диметилформамид(DMF)+диметилсульфоксид(DMSO), наносился на подложку методом центрифугирования, после чего образец покрывался толуолом для первичной защиты от деградации, а затем производился отжиг при температуре 100 °С в течение 10 минут. Процесс получения перовскитной пленки изображен на рисунке 1. После отжига на готовую пленку методом центрифугирования наносился слой C<sub>60</sub>, растворенного в толуоле [2].

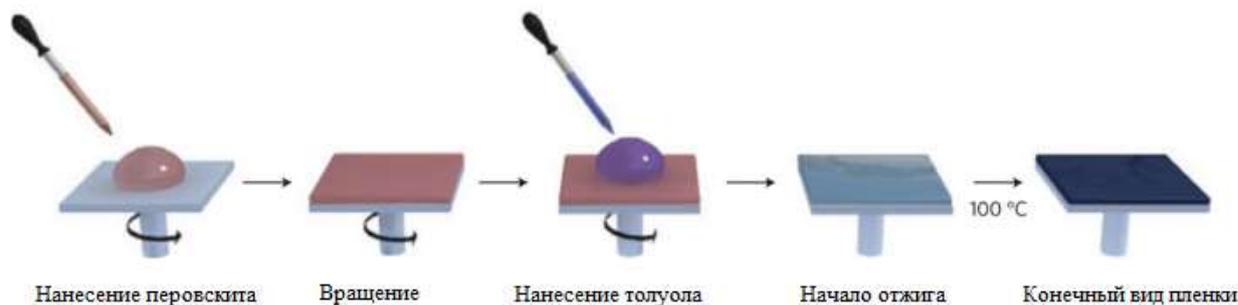


Рис. 1. Схематическое изображение метода получения пленки перовскита.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) для полученных образцов до и после нанесения слоя  $C_{60}$  представлены на рис. 2.

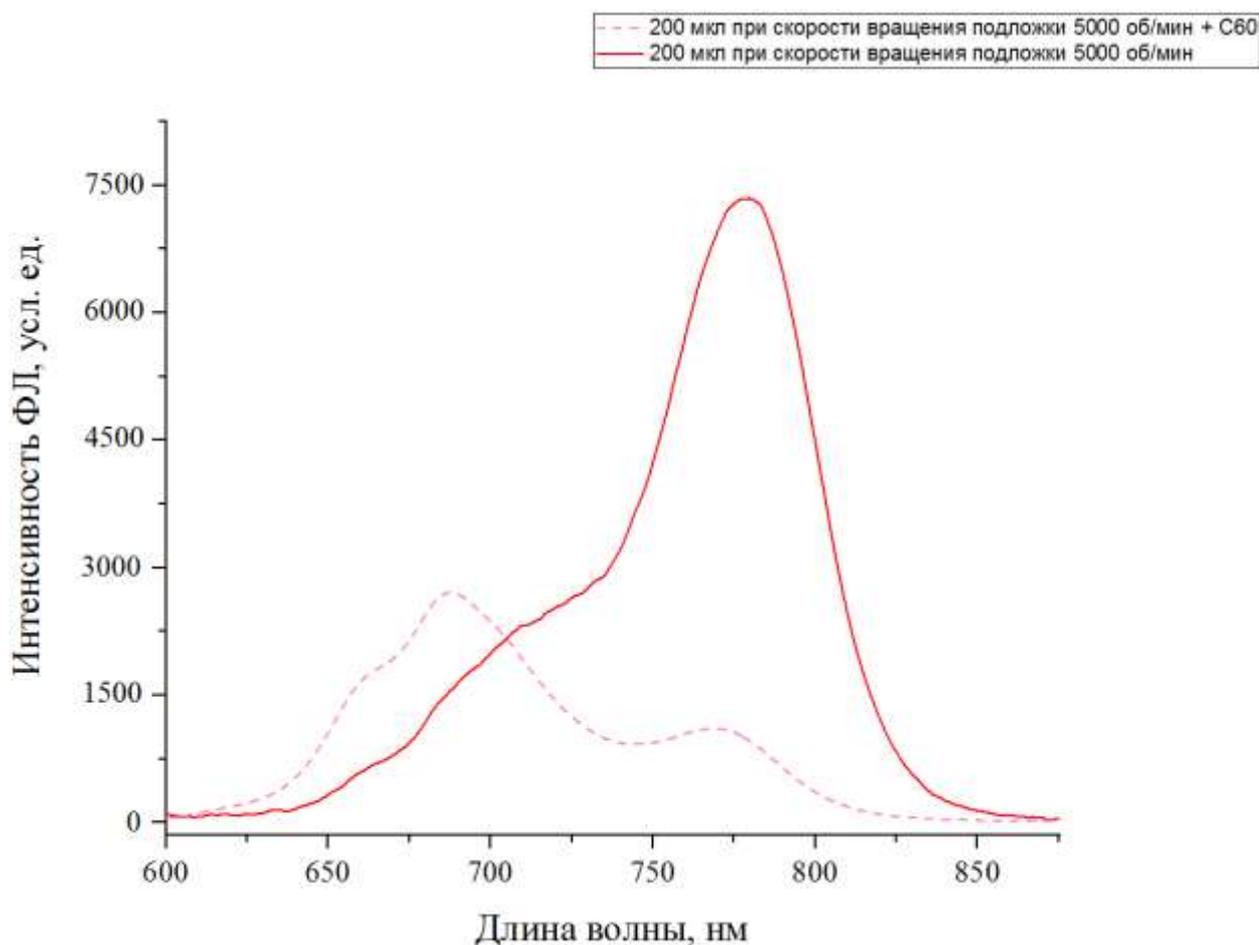


Рис. 2. Спектры ФЛ для полученных образцов до и после нанесения слоя  $C_{60}$ .

Из полученных спектров ФЛ видно, что нанесение слоя  $C_{60}$  увеличивает пики интенсивностей на длине волны 680 нм, при этом произошло существенное уменьшение исходного пика на 780 нм. Эффект увеличения интенсивности вторичного пика имеет место ввиду глубокого проникновения частиц фуллерена в структуру пленки и образования новых центров поглощения. Отмечается, что уменьшение пиков фотолюминесценции, может являться демонстрацией способности фуллерена извлекать носители заряда, так как происходит релаксация фотовозбужденных электронов в перовскит, в основное состояние, через низшую незанятую молекулярную орбиталь (LUMO)  $C_{60}$  [3].

Данные эффекты могут быть в дальнейшем использованы в комбинации с увеличением концентрации  $FAPbI_3$  для максимального расширения спектра. Однако ввиду того, что нанесение слоя фуллеренов методом центрифугирования и вторичный отжиг образца происходят в открытой среде, фактор деградации уменьшает высоту пиков почти вдвое. Возможно, перенос процесса производства пленки в вакуум или инертную среду позволит уменьшить фактор деградации при создании структур.

Таким образом, в процессе работы были созданы тонкие пленки кристаллической структуры перовскит  $(\text{FAPbI}_3)_{0.8}(\text{MAPbBr}_3)_{0.2}$  и исследованы их спектры фотолюминесценции до и после добавления слоя фуллерена  $\text{C}_{60}$ .

### Список литературы

1. Jeon, N.J.; Noh, J.H.; Yang, W.S.; Kim, Y.C.; Ryu, S.; Seo, J.; Seok, S.I. Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature* 2015, 517, 476–480
2. Chen, L.-C.; Chen, C.-C.; Chen, J.-C.; Wu, C.-G. Annealing effects on high-performance  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovskite solar cells prepared by solution-process. *Solar Energy* 2015, 122, 1047–1051.
3. Ahmad, Taimoor & Wilk, Barbara & Radicchi, Eros & Fuentes Pineda, Rosinda & Spinelli, Pierpaolo & Herterich, Jan & Castriotta, Luigi & Dasgupta, Shyantana & Mosconi, Edoardo & Angelis, Filippo & Kohlstädt, Markus & Würfel, Uli & Di Carlo, Aldo & Wojciechowski, Konrad. (2020). New Fullerene Derivative as an n-Type Material for Highly Efficient, Flexible Perovskite Solar Cells of a p-i-n Configuration. *Advanced Functional Materials*. 10.1002/adfm.202004357.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Д.А. ШИШКИНА, Д.А. ЖИГАЕВ

*ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева»*

**Аннотация.** В данной работе получена физико-математическая модель электрохимического травления пористого кремния в среде COMSOL Multiphysics. Представлены результаты работы. Проведены сравнения с экспериментом.

**Ключевые слова:** пористый кремний, физико-математическая модель, COMSOL Multiphysics

### Введение

Наиболее часто встречающийся способ получения пористого кремния — травление. Можно выделить несколько основных типов:

- электрохимическое,
- химическое,
- металл-стимулированное химическое травление (МСХТ),
- плазмохимическое травление и др.

Однако иногда бывает сложно предугадать, как будет проходить травление на той или иной поверхности

Для решения данной проблемы есть несколько путей решения:

1. Экспериментальный — поиск закономерностей путём многократного повторения эксперимента в различных условиях: время, материал, тип поверхности подложки, различные внешние условия;
2. Теоретический — посредством моделирования электрического поля предугадать, в каких областях пластины будет проходить травление более активно; или задавая различные сложные условия, получать картину травления.

В данной работе представлены методы моделирования процессов электрохимического травления пористого кремния. Пористый кремний как материал современной макро- и нанoeлектроники, содержит наноразмерные структурные элементы, наличие которых существенно отличает его от более традиционных свойств обычных материалов, таких как: германий, традиционный кремний и монокремний [1].

### Методика проведения эксперимента

Для получения пористого кремния использовались пластины монокристаллического кремния марки КБД-10. В качестве травителя применялся спиртовой раствор плавиковой кислоты. Пористый кремний получался в результате электро-химического травления в ячейке горизонтального типа (рис. 1).

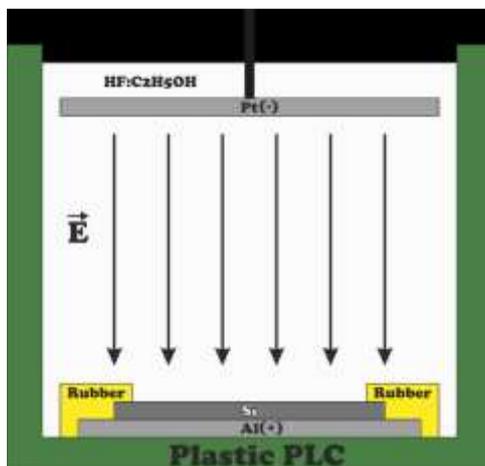


Рис. 1. Ячейка горизонтального типа для электрохимического травления [2].

Для изучения морфологии структуры использовался растровый электронный микроскоп FEI QUANTA-200.

### Моделирование

В данной работе представлена модель подложки с кремнием в объеме электролита, созданная в интегрированной среде численного моделирования COMSOL Multiphysics. На рис. 1 представлена модель кремния в пирамидальном виде внутри электролита.

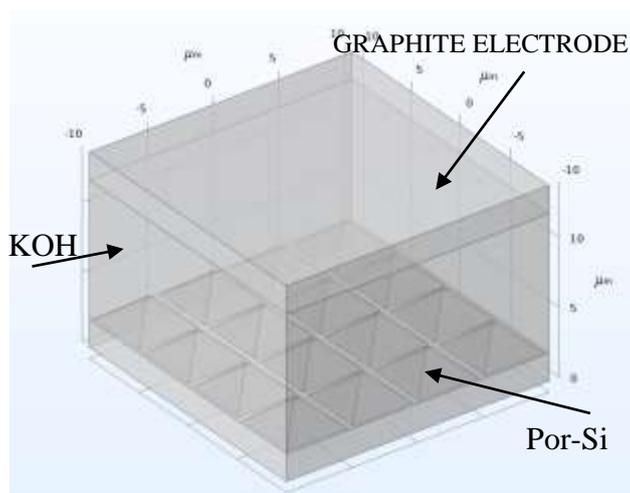


Рис. 2. Модель на платформе COMSOL Multiphysics

Одним из основных уравнений было уравнение Нернста-Планка (1) для определения зависимости диффузионного тока от концентрации ионов и напряженности электрического поля в электролите.

$$\vec{j}_m = -D\nabla c - U_m Z F c \nabla \varphi \quad (1)$$

где  $\vec{j}_m$  — плотность потока моля ионов,  $c$  — концентрация ионов,  $D$  — коэффициент диффузии,  $U_m$  — подвижность ионов для моля,  $Z$  — зарядовое число,  $F$  — постоянная Фарадея,  $\varphi$  — напряженность поля выражена через градиент потенциала.

### Результаты

На рис. 3 изображен электролитический потенциал во время электрохимического травления кремния.

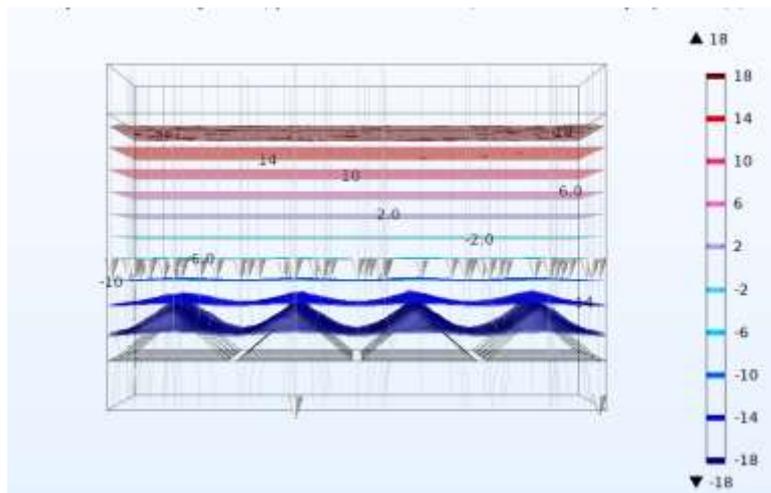


Рис. 3. Распределение электролитического потенциала.

Так же было получено изображение линий тока внутри электролита во время травления. На рис. 4 можно заметить, что векторы огибают пирамидальную поверхность кремния, наблюдается резкое возрастание плотности тока, это видно по изменению цвета линий рисунка. Данные факты говорят о большей скорости травления в этих областях.

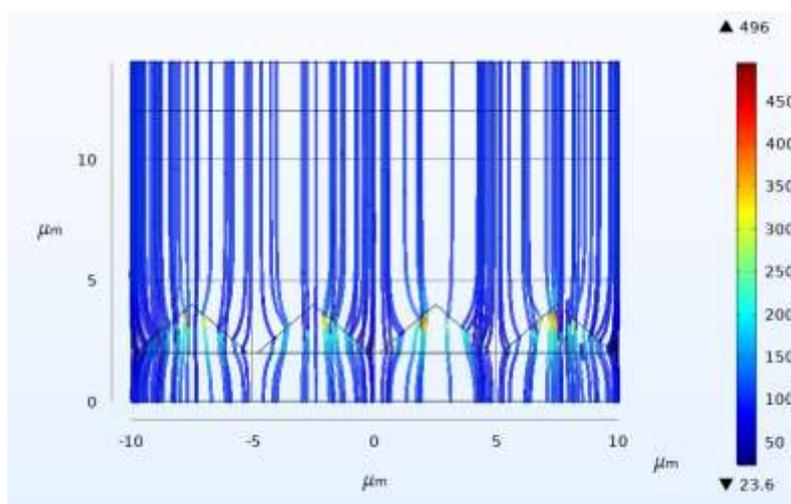


Рис. 4. Линии тока во время электрохимического травления.

При сравнении с экспериментальными результатами, приведенные на рис. 4, можно заметить сходства тёмных областей на стыке пирамид и линий тока во время электрохимического травления в модели.

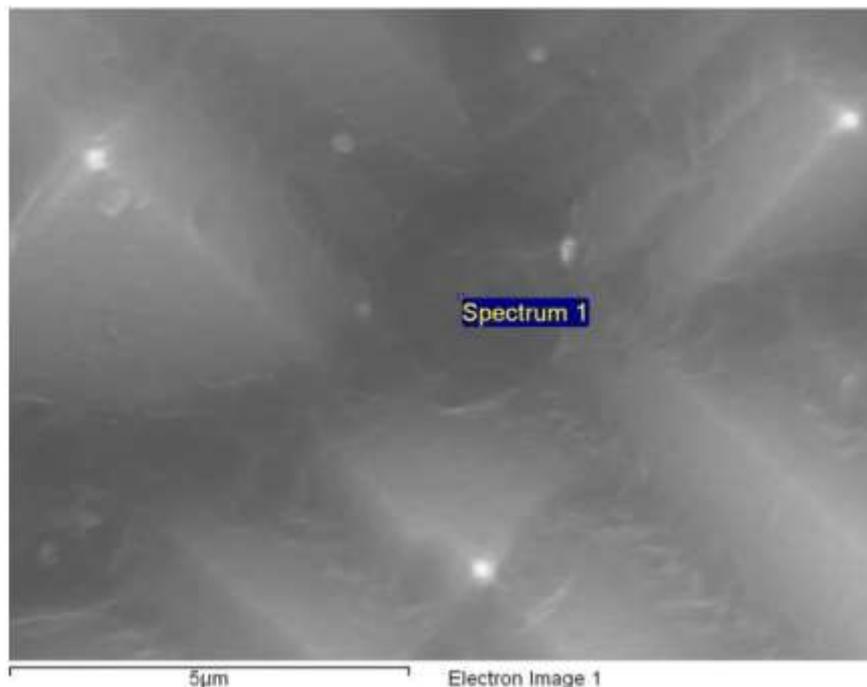


Рис. 4. РЭМ изображение слоя пористого кремния, полученного электрохимическим травлением.

### Заключение

В работе получена физико-математическая модель электрохимического травления кремния, показано хорошее согласие теории и эксперимента.

### Список литературы

1. Треуголов В.В. (2011). Пористый кремний: технология, свойства, применение [Текст]: монография / В. В. Трегулов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Рязанский гос. ун-т им. С. А. Есенина». — Рязань : Рязанский гос. ун-т им. С. А. Есенина, 2011. — 121, [2] с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 978-5-88006-677-3.
2. I A Shishkin et al (2021) The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model J. Phys.: Conf. Ser. 1745 012004.

## ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ПРОВОДИМОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ИМПЛАНТИРОВАННЫХ SiC ДИОДОВ ШОТТКИ

Н.Н. ЖОГАЛЬ, А.В. СОЛОМНИКОВА, Г.Е. ЯКОВЛЕВ

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

**Аннотация.** В работе изучались спектры проводимости образцов SiC с различными дозами облучения электронами. Проводимость измерялась с помощью комплекса спектроскопии адмиттанса на базе криогенной зондовой станции. Математическая обработка полученных зависимостей включала в себя построение графиков Аррениуса, нахождение энергии активации, и моделировании графиков проводимости. Графики Аррениуса, полученные из зависимостей  $G(f)$  и  $G(T)$  совпадают. Результаты измерения проводимости для образцов с различными дозами излучения показывают различные значения энергии активации примеси.

**Ключевые слова:** спектроскопия адмиттанса, проводимость, карбид кремния, энергия активации примеси

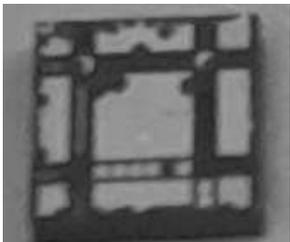
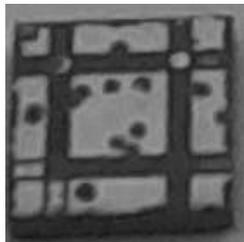
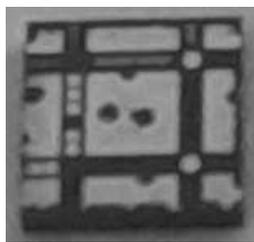
В настоящее время карбид-кремниевые диоды актуальны в высокотемпературной, высоковольтной и радиационностойкой электронике. Они находят применение в автомобильной, авиационной электронике, коммутаторах солнечных преобразователей большой площади, преобразователях в устройствах питания, в устройствах для коррекции коэффициента мощности [1]. Основными преимуществами диодов Шоттки (ДШ) являются высокая скорость переключения и очень малые потери энергии при переключении. Блокирующее напряжение SiC ДШ может достигать нескольких киловольт. [2]

Важным параметром любых приборных структур является глубина залегания легирующих примесей. Цель данной работы заключается в измерении семейства частотных зависимостей проводимости от температуры для дальнейшего построения графиков Аррениуса, по которым можно найти энергию активации примесей.

В работе изучался набор p-n диодов 4H-SiC с нанесенными контактами, которые облучались электронами с энергией 0.9 МэВ и различными дозами облучения (от 0 до  $1.5 \cdot 10^{14}$ ). Диоды изготавливались на основе коммерческих структур p типа, область p типа получалась путем имплантирования атомов бора с последующим отжигом. Это нужно для уменьшения тока утечки при обратном смещении. Внешний вид образцов и параметры облучения представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Образцы SiC с различной степенью облучения электронами**

Название	<i>неobl</i>	<i>1605</i>	<i>1602</i>
Доза облучения D, см <sup>2</sup>	0	$0.75 \cdot 10^{14}$	$1.5 \cdot 10^{14}$
Фотография			

Экспериментальные исследования проводились на измерительном комплексе спектроскопии адмиттанса на базе криогенной зондовой станции. Измерительный комплекс интегрирует несколько установок. Зондовая станция JANIS CCR10 (рис. 2а) обеспечивает герметичное пространство для удержания вакуума вокруг объекта измерения, а также имеет защиту от механических колебаний внешней среды посредством пневморазвязки. Внутри станции установлены зонды, подключающие образец к измерителю адмиттанса.

Насосная станция Pfeiffer (рис.2б), включающая форвакуумный и турбомолекулярный насосы, создаёт вакуум, необходимый для обеспечения широкого диапазона температур. После достижения нужного давления (ниже  $10^{-5}$  мбар) запускается криогенная установка. Температура контролируется с помощью двух температурных контролеров LakeShore 331 и LakeShore 336. Электрические измерения проводятся с помощью LCR-метра Agilent E4980A.

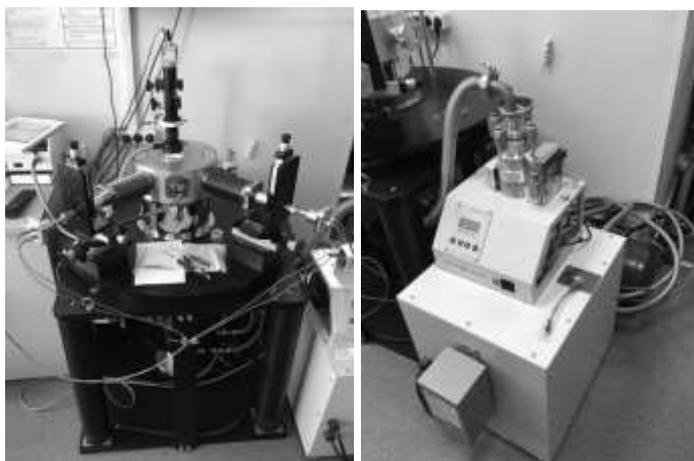


Рис.2. Зондовая станция JANIS(а) и Насосная станция Preiffer(б).

В данной работе основным методом исследования была температурная и частотная спектроскопия проводимости. Измерения проводились в температурном диапазоне от 26 до 440 К при частотах от 1кГц до 2МГц.

Для всех образцов были измерены спектры емкости и проводимости во всем доступном интервале температур  $T$ . Высокочастотная проводимость  $G$  и, соответственно, емкость  $C$  структуры зависят от частоты  $\omega$  и температуры следующим образом [3]:

$$G(T) \sim \frac{e_n(T)\omega^2}{e_n^2(T) + \omega^2} S \left( \frac{\epsilon\epsilon_0 q N^+}{2U} \right)^{1/2}, \quad C(T) \sim \frac{e_n^2(T)}{e_n^2(T) + \omega^2} S \left( \frac{\epsilon\epsilon_0 q N^+}{2U} \right)^{1/2}.$$

Здесь  $e_n(T)$  – скорость эмиссии носителей заряда с энергетического уровня,  $N^+$  – концентрация ионизованных примесных центров при данной температуре,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $q$  — элементарный заряд, равный  $1.6 \cdot 10^{-19}$ ,  $U$  — напряжение, подаваемое на образец.

Данные проведенных экспериментов показывают, что спектры проводимости необлученного образца имели характерный вид: амплитуды пиков почти не зависят от частоты и составляют 4,5–5 пФ, они расположены в диапазоне температур 20–110 К.

На рис. 3 показаны температурные спектры приведенной проводимости ( $G/\omega$ ) и емкости ( $C$ ) исследуемых образцов. Как видно, происходит ожидаемый сдвиг кривых проводимости в область более высоких температур с увеличением частоты. Это является отличительной чертой термоэлектронной эмиссии.

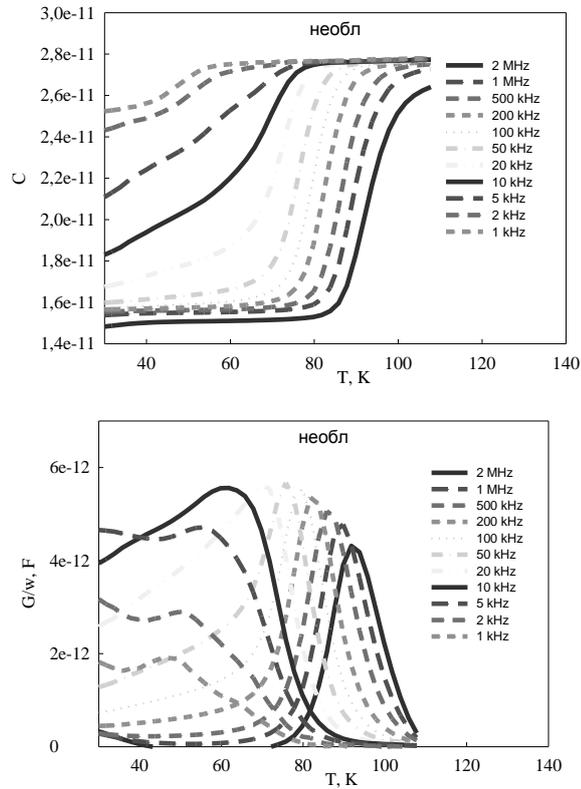


Рис. 3. График  $G/w(T)$  и  $C(T)$  для необлучённого образца

Альтернативно измерялись частотные спектры проводимости при различных температурах от 26 до 130 К (рис.4).

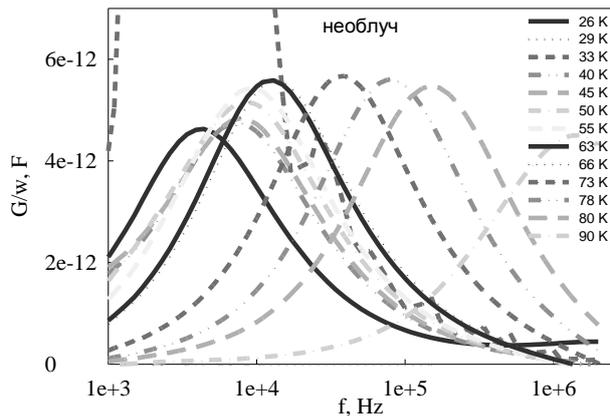


Рис. 4. График  $G/w(f)$  при различных температурах для необлученного образца.

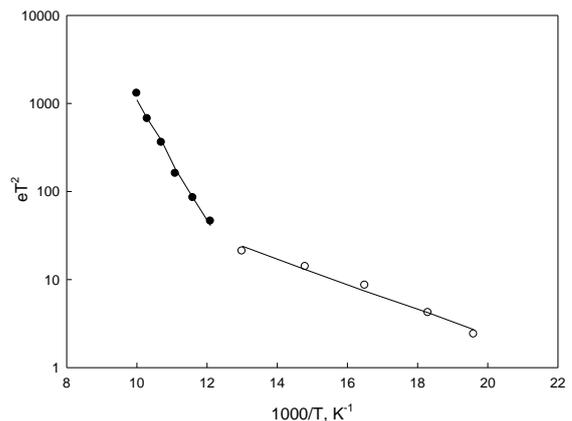


Рис. 5. Графики Аррениуса для необлучённого образца.

Далее из графиков  $G/w(T)$  и  $G/w(f)$  строились графики Аррениуса в координатах  $\ln(\omega/T^2) = f(1/T)$  и вычислялись энергии активации носителей заряда с примесного уровня, рис. 5.

Для всех образцов были зарегистрированы по 2 глубоким уровням. В табл. 2 сведены полученные параметры исследованных образцов разной степени облучения: энергии активации примеси, полученные из анализа спектров проводимости.

Таблица 2

**Измеренные параметры примесных уровней образцов**

Образец	Необлуч	1605	1603
Доза облучения $D$ , $\text{см}^2$	0	$0.75 \cdot 10^{14}$	$1.5 \cdot 10^{14}$
Энергия активации $E_A$ , мэВ	$131 \pm 30$ $19 \pm 15$	$132 \pm 17$ $28 \pm 16$	$94 \pm 16$ $27 \pm 13$

Для верификации результатов эксперимента было проведено моделирование полученных экспериментальных спектров с использованием данных, полученных из графиков Аррениуса. Построенные зависимости приведены на рис. 6 в сравнении с экспериментально полученными экспериментальными спектрами.

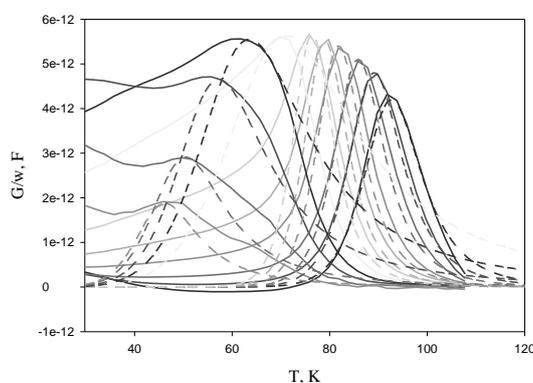


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и моделированных графиков  $G/w(f)$  при различных температурах для необлученного образца.

Полученные уровни атрибутируются с азотными донорами в локальной гексагональной и кубической конфигурациях решётки SiC. В отличие от мелкого уровня с энергией около 30 мэВ, энергия глубокого уровня (соответствующего центру в кубической конфигурации) понижается с увеличением дозы облучения с 131 до 94 мэВ.

**Список литературы**

1. Лебедев А.А., Козловский В.В., Левинштейн М.Е. Отжиг высоковольтных 4H-SiC диодов Шоттки, облученных электронами при высокой температуре. Физика и техника полупроводников, 2022, т. 56, вып. 4.
2. Лебедев А.А., Козловский В.В., Иванов П.А., Левинштейн М.Е., Зубов А.В. Влияние облучения электронами высокой энергии на характеристики ударных токов высоковольтных интегрированных 4H-SiC-диодов Шоттки. Физика и техника полупроводников, том 53, вып. 10 — 2019.
3. Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса, изд. «Элмор», Санкт-Петербург. 2007.
4. T. Kimoto, A. Itoh, H. Matsunami, S. Sridhara, L. L. Clemen, R. P. Devaty, W. J. Choyke, T. Dalibor, C. Peppermuller, G. Pensl Nitrogen donors and deep levels in high-quality 4H-SiC epilayers grown by chemical vapor deposition. Application Physics Letters 67 (19), 6 November 1995.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМОРФНЫХ МОДИФИКАЦИЙ $\text{TiO}_2$ В УСЛОВИЯХ МЯГКОЙ ХИМИИ

В.В. ЗЛОБИН

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

**Аннотация.** В работе исследовано влияние природы прекурсора синтеза (химической предыстории системы) на процессы формирования нанокристаллов  $\text{TiO}_2$ , сделан вывод о значительном вкладе предзародышевой организации на фазообразование в системе  $\text{TiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Изучена кинетика кристаллизации  $\text{TiO}_2$  в условиях мягкой химии, показано, что температура синтеза в значительной степени влияет на процессы роста нанокристаллов диоксида титана. Рассмотрена зависимость морфологических, размерных и поверхностных характеристик получаемых наночастиц от условий синтеза.

**Ключевые слова:** диоксид титана, гидротермальный синтез, мягкая химия, фазообразование.

Функциональные наноматериалы на основе диоксида титана представляют сегодня значительный интерес не только с точки зрения научных исследований, но и перспективности их применения в различных областях, таких как создание гибридных фотовольтаических ячеек [1, 2], фотоактивных систем очистки воды и воздуха от органических загрязнителей и антибактериальных покрытий [3-5], мемристивных вычислительных систем [6].

Физико-химические свойства наноразмерного  $\text{TiO}_2$  определяются большим числом параметров, так, например, эффективность работы диоксида титана в качестве фотокатализатора во многом зависит от наличия той или иной кристаллической структуры, размеров наночастиц, степени развитости их поверхности и характера пор, морфологии нанокристаллов [7, 8]. Эффективно управлять характеристиками формирующихся наночастиц можно в условиях мягкой химии, при этом зачастую у оксидных нанопорошков, синтезированных в таких условиях, наблюдаются слабая степень агломерации, узкий диапазон распределения частиц по размерам [9, 10].

В связи с этим представленная работа посвящена комплексному исследованию процессов формирования полиморфных модификаций диоксида титана в условиях мягкой химии, зависимости характеристик получаемых наночастиц от параметров синтеза.

Нанокристаллы диоксида титана с той или иной структурой, многофазные смеси полиморфных модификаций  $\text{TiO}_2$  получали гидротермальной обработкой в стальных автоклавах с фторопластовыми ячейками прекурсоров синтеза при температуре  $T = 200^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$  и давлении  $P = 70$  МПа, продолжительность изотермической выдержки варьировалась в широком интервале значений от 15 мин до 24 часов. В роли гидротермального флюида выступала дистиллированная вода, для подкисления среды использовался разбавленный раствор соляной кислоты, для подщелачивания — водный раствор аммиака.

В качестве прекурсоров гидротермального синтеза использовался рентгеноаморфный гидратированный диоксид титана  $\text{TiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , получаемый методом прямого осаждения из раствора тетрахлорида титана водным раствором аммиака; разбавленный раствор тетрахлорида титана с молярной концентрацией  $C_M \approx 0,5$  моль/л.

Так же наночастицы  $\text{TiO}_2$  получали температурным гидролизом ( $T_{\text{сум}} = 85^\circ\text{C}$ ) раствора тетрахлорида титана  $C_M \approx 0,15$  моль/л с последующим досаждением водным раствором аммиака до  $pH = 12$  и гидротермальной обработкой.

Синтезированные материалы исследовались комплексом методов физико-химического анализа, включающим порошковую рентгеновскую дифракцию, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, низкотемпературную сорбцию азота и т.д.

На основании проведенных исследований можно заключить, что решающим фактором формирования нанокристаллов  $\text{TiO}_2$  с той или иной структурой является состояние прекурсора гидротермального синтеза, его природа и способ получения, которое, по-видимому, определяет наличие в нем предзародышевых центров различных полиморфных модификаций диоксида титана.

Однако следует отметить, что параметры гидротермального синтеза (температура,  $pH$ , продолжительность синтеза) в значительной степени определяют преимущественные механизмы роста нанокристаллов  $\text{TiO}_2$ , а как следствие и устойчивость брукитной модификации диоксида титана, размерные и морфологические характеристики формирующихся наночастиц. При этом средние размеры наночастиц, определяющие стабильность как  $\text{TiO}_2$  со структурой анатаза, так и со структурой рутила, играют не менее важную роль в ходе цепочек фазовых трансформаций.

### Список литературы

1. Kalidoss P., Venkatachalapathy S., Suresh S. Optical and Thermal Properties of Therminol 55- $\text{TiO}_2$  Nanofluids for Solar Energy Storage. *International Journal of Photoenergy*, 2020, Vol. 2020.
2. Marandi M., Goudarzi Z., Moradi L. Synthesis of randomly directed inclined  $\text{TiO}_2$  nanorods on the nanocrystalline  $\text{TiO}_2$  layers and their optimized application in dye sensitized solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 711, P. 603-610.
3. Perović K., dela Rosa F.M., Kovačić M., et al. Recent Achievements in Development of  $\text{TiO}_2$ -Based Composite Photocatalytic Materials for Solar Driven Water Purification and Water Splitting. *Materials*, 2020, 13, P. 1338.
4. Kolen'ko Y.V., Garshev A.V., et al. Photocatalytic activity of sol-gel derived titania converted into nanocrystalline powders by supercritical drying. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2005, 172, P. 19-26.
5. Cabrera-Reina A., Mart'inez-Piernas A.B., et al.  $\text{TiO}_2$  photocatalysis under natural solar radiation for the degradation of the carbapenem antibiotics imipenem and meropenem in aqueous solutions at pilot plant scale // *Water Research*, 2019. 166. P. 115037.
6. Illarionov G., Morozova S.M., Krishtop V.V. et. al. Memristive  $\text{TiO}_2$ : Synthesis, Technologies, and Applications // *Frontiers in Chemistry*, 2020, Vol. 8. P. 724.
7. Macwan D.P., Dave P.N., Chaturvedi S. A review on nano- $\text{TiO}_2$  sol-gel type syntheses and its applications. *J. Mat. Sci.*, 2011, 46 (11), P. 3669-3686.
8. Pottier A., Chaneac C., Tronc E., Mazerollesb L., Jolivet J. Synthesis of Brookite  $\text{TiO}_2$  Nanoparticles by Thermolysis of  $\text{TiCl}_4$  in Strongly Acidic Aqueous Media. *Journal Materials Chemistry*. 2001, 11, P. 1116-1121.
9. Nian J.N., Teng H. Hydrothermal synthesis of single-crystalline anatase  $\text{TiO}_2$  nanorods with nanotubes as the precursor. *J. Phys. Chem. B.*, 2006, 110, 4193-4198.
10. Masahiro Yoshimura, Shigeyuki Somiya, Hydrothermal synthesis of crystallized nano-particles of rare earth-doped zirconia and hafnia. *Mat. Chem. Ph.*, 1999, 61(1), 1-8.

## СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СО СТРУКТУРОЙ ПИРОХЛОРА В СИСТЕМЕ $\text{TiO}_2$ - $\text{Gd}_2\text{O}_3$ МЕТОДОМ ГОРЕНИЯ

В.В. ИВАНОВА, В.В. ЗЛОБИН

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

**Аннотация.** Рассмотрены процессы фазообразования в системе  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  при термообработке. Показана значительная роль химической предыстории системы на процесс формирования

нанокристаллов титаната гадолиния со структурой пирохлора. Исследованы зависимости размерных и поверхностных характеристик получаемых наночастиц от параметров синтеза.

**Ключевые слова:** диоксид титана, оксид гадолиния, структура пирохлора.

$Gd_2Ti_2O_7$  является химически стабильным соединением, которое может включать в свою структуру атомы редкоземельных металлов без ее значительного искажения, а так же обладает высокой концентрацией подвижных кислородных вакансий, что позволяет использовать титанат гадолиния в качестве функциональной платформы для фотoluminesцентных наноматериалов и твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ) [1 — 3]. Так в работе [4] демонстрируется возможность применения  $Gd_2Ti_2O_7$  с структурой пирохлора, допированного  $Dy^{3+}$  или  $Tm^{3+}$ , в светодиодах белого света и безртутных люминесцентных лампах. Свойства  $Gd_2Ti_2O_7$  существенно зависят от способа его получения [5], поэтому целью данной работы было исследование структурных трансформаций в системе  $Gd_2O_3$ - $TiO_2$  и изучение влияния метода синтеза на размерные и поверхностные характеристики формирующегося титаната гадолиния со структурой пирохлора.

Композитные материалы на основе  $Gd_2O_3$  и  $TiO_2$  были получены двухстадийным синтезом. На первом этапе готовились два раствора: водный раствор нитрата гадолиния и раствор полиэтиленгликоля (ПЭГ-400) и тетраизопропоксида титана в изопропиловом спирте. Затем они смешивались и при температуре  $T = 75^\circ C$  доводились до гелеобразного состояния. На втором этапе проводилась термическая обработка полученной композиции в муфельной печи при варьировании температуры отжига в широком диапазоне значений.

Изучение фазового состава синтезированных материалов осуществлялось методом порошковой рентгеновской дифракции на дифрактометре Rigaku SmartLab 3, идентификация кристаллических модификаций проводилась с использованием открытой кристаллографической базы данных и пакета программного обеспечения Rigaku SmartLab Studio II, средний размер кристаллитов оценивался по уширению линий рентгеновской дифракции. Уточнение параметров элементарной ячейки проводилось с помощью метода Ритвельда. Морфология кристаллических агломератов, характер поверхности оценивались методом растровой электронной микроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH. Исследование элементного состава осуществлялось методами рентгенофлуоресцентной спектроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

В ходе исследований было показано, что  $Gd_2Ti_2O_7$  со структурой пирохлора образуется при  $T = 800^\circ C$ , при этом значительную роль в процессе формирования титаната гадолиния играет степень однородности распределения компонентов системы в материале и, по-видимому, наличие определенной пространственной организации титан- и гадолинийсодержащих комплексов в получаемом геле. Изучена зависимость размерных и поверхностных характеристик формирующихся наночастиц в системе  $Gd_2O_3$ - $TiO_2$  от параметров синтеза, в частности, от температуры термообработки.

### Список литературы

1. Zhou R., Zhao X., Yue Bun Pun E., et al. Temperature sensitivity based on  $Er^{3+}$  fluorescence fluctuation in  $Gd_2Ti_2O_7$ :  $Er^{3+}$ - $Yb^{3+}$  porous nanofibers // J. Alloys Compd., 2020, Vol. 838, 155554.
2. Suganya M., Ganesan K., Vijayakumar P. Raman and photoluminescence spectroscopic studies on structural disorder in oxygen deficient  $Gd_2Ti_2O_7$ - $\delta$  single crystals // Cryst. Res. Technol, 2022, Vol. 57 (4).
3. Wilde P. Defects and diffusion in pyrochlore structured oxides // Solid State Ionics, 1998, Vol. 112 (3-4). P. 173-183.

4. Antić Ž., Kuzman S., Đorđević V., et al. White- and blue-light-emitting dysprosium (III) and terbium (III)-doped gadolinium titanate phosphors. *Luminescence*, 2016, Vol. 32(4), P. 539-544.
5. Zhang W., Tao Y., Li C. Sol-gel synthesis of Gd<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/HZSM-5 composite photocatalyst for ofloxacin degradation. *J. Photochem. Photobiol. A*, 2018, Vol. 364, P. 787-793.

## ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК К ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОДЛОЖКАМ ЗА СЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ НАНЕСЕНИЯ

Т.В. ИВАНОВА<sup>1</sup>, Н.С. ПЩЕЛКО<sup>2</sup>, Е.С. ЧИЧКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

<sup>2</sup>Военная академия связи им. С.М. Буденного

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы, связанные с технической реализацией электроадгезионного способа повышения адгезии наносимых покрытий, используемого одновременно с самим процессом их нанесения. В экспериментах использовались подложки с поданным на их поверхность электрическим потенциалом. Было обнаружено значительное влияние величины этого потенциала на адгезию к диэлектрическим подложкам пленок, наносимых методом термического испарения в вакууме. В качестве количественной меры адгезии использовалась работа отрыва пленок от поверхности подложки. Возможности практической реализации метода использования электрического поля для улучшения адгезии проводящих пленок к диэлектрическим подложкам представляются перспективными для получения атомарно тонких слоев гексагонального нитрида бора разной толщины.

**Ключевые слова:** электрическое поле, электроадгезия, пленки, гетероструктуры, гексагональный нитрид бора, hbn, двумерные материалы.

Большой интерес представляет возможность улучшения адгезии пленок непосредственно в процессе их получения. Одной из мер, применяемых для увеличения адгезии пленок в процессе их конденсации является нагрев подложки. Однако эта мера в ряде случаев является недостаточной. В некоторых методах нанесения пленочных покрытий, например, при ионно-плазменном распылении «со смещением» предусматривается подача отрицательного потенциала на подложку относительно плазмы. Положительные ионы плазмы бомбардируют подложку в течение всего процесса нанесения пленки, что позволяет получать более высокие значения адгезии. Недостаток метода состоит в том, что отрицательный потенциал препятствует образованию переходного окисного слоя, что в некоторых случаях приводит к получению пленок с недостаточной адгезией. Подачей небольшого положительного потенциала на первых стадиях формирования пленки удается обойти эти трудности. Можно видеть, что в данном способе разность потенциалов создается между плазмой и подложкой, а не на границе раздела между пленкой и подложкой, поэтому и не достигается во всех случаях необходимой величины адгезии.

В разработанном способе в процессе вакуумного осаждения пленки предусматривается подача положительного потенциала непосредственно на поверхность, на которую осаждается пленка [1–7,9,10]. Для этого на этой поверхности заранее должно быть сделано небольшое контактное пятно, к которому можно подключить прижимной контакт с положительным относительно противоположной поверхности подложки потенциалом.

Эксперименты выполнялись по схеме, показанной на рис. 1.

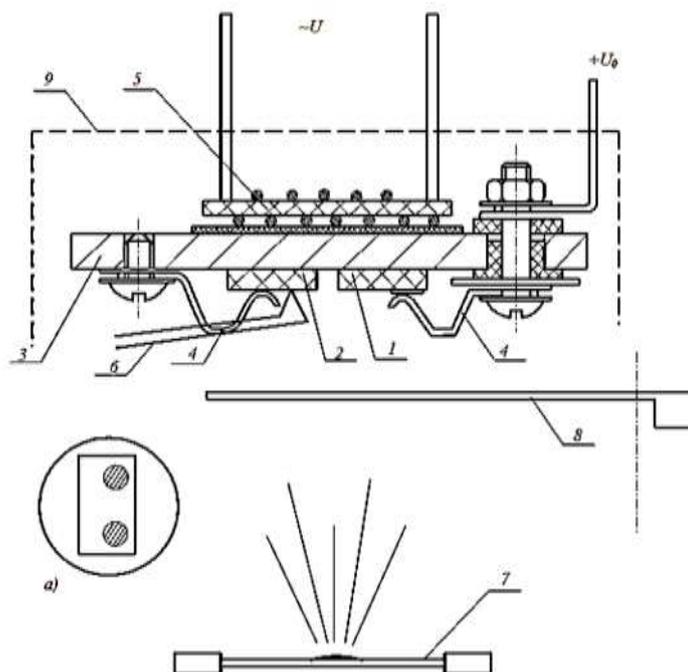


Рис.1. Оснастка для использования электроадгезионных сил в процессе вакуумного нанесения пленки.  
1,2 — подложки, 3 — тепловыравнивающее основание, 4 — пружина, 5 — нагреватель, 6 — термопара ХК,  
7 — испаритель, 8 — заслонка, 9 — тепловой экран.  
а) подложка 1 (вид сверху).

Экспериментальная и контрольная подложки 1 и 2 закреплялись на тепловыравнивающем медном основании 3 с помощью стальных пружин 4. Через эти же пружины к подложке 1 подводился положительный потенциал. При этом потенциал подавался только на подложку 1, в то время как на контрольную подложку 2 напряжение не подавалось. Отрицательный потенциал подавался на основание подложкодержателя 3. Электрическая схема была аналогична схеме, использованной при получении электроадгезионных соединений, например, при «склеивании» оконного стекла с алюминиевой фольгой. Подогрев подложек осуществлялся нагревателем 5 и контролировался термопарой хромель-копель 6.

Для обеспечения надежного гальванического контакта проводящих пружин с образующейся пленкой на подложку заранее наносились алюминиевые контактные площадки, рис. 5а.

Осаждение алюминиевых пленок осуществлялось с вольфрамового испарителя 7 в вакууме при давлении  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. со скоростью  $\sim 0,015$  мкм/с. Толщина пленок составляла около 0,2 мкм. В качестве материала подложки использовалось оконное стекло. Увеличение приложенного к пленке и подложке напряжения, как это видно из рис. 2, приводит к значительному росту адгезии пленок, к которым прикладывалось поле, по отношению к тем образцам, которые испытывали только нагрев и, практически, не изменили своей адгезии.

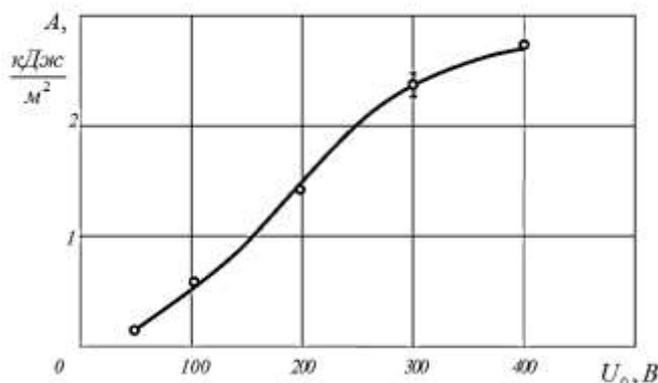


Рис.6. Зависимость адгезии (работы отрыва) алюминиевой пленки от электрического напряжения, использованного при ее электроадгезионной обработке. Температура подложки  $T=120^{\circ}\text{C}$ .

Воздействие электрического поля на образование адгезионной связи пленка-подложка, вероятно, определяется теми же причинами, которые влияют на адгезию уже нанесенных пленок, а именно, появлением большого механического давления на границе раздела пленка — подложка, вследствие особенностей миграционной поляризации стекла и формирования промежуточного окисного слоя между пленкой и подложкой.

Однако влияние электрического поля на адгезию в момент конденсации пленки оказалось значительнее, чем на адгезию уже нанесенных пленок. Подтверждение этого факта было проведено следующим образом — напряжение прикладывалось к пленке уже после конденсации в одних и тех же условиях (вакуум, температура, напряжение), до вынимания подложки и нарушения вакуума. Увеличение адгезии пленки к подложке в этом случае было значительно меньшим, чем у образцов, конденсация пленки на которые производилась в электрическом поле. Наложение электрического поля при конденсации пленки приводит, по-видимому, к дополнительной активации поверхности подложки и, тем самым, к появлению большого числа химических связей между адсорбированными атомами металла и материалом подложки. Электроадгезионные силы заставляют атомы металла эффективней притягиваться к подложке и занимать на ней места с минимумом потенциальной энергии, то есть, более глубокие потенциальные ямы, и за счет этого увеличивают прочность соединений пленка-подложка. Вероятно, также сказываются различные эффекты, связанные с взаимодействием электрического поля с находящимися в нем объектами [8], в частности, втягивающее действие неоднородного электрического поля, обусловленное проявлением на малых расстояниях дискретности электрического заряда [11].

В настоящее время процесс создания материалов с заданными свойствами является одним из ключевых факторов развития современной полупроводниковой электроники и оптоэлектроники. Гетероструктуры, созданные путем объединения двух или более материалов с различными электронными свойствами (например, изоляционными, полупроводниковыми и металлическими) на одной подложке, являются центральной концепцией современной электроники. Гексагональный нитрид бора (hBN) является интересным кандидатом для создания устройств для оптоэлектроники вследствие возможности применения в качестве отличного диэлектрика для инкапсуляции активных элементов. Однако получить тонкие слои hBN для его дальнейшей интеграции на наноструктурированные поверхности затруднительно. Эксперименты, которые мы проводим в настоящее время с использованием электрического поля при получении слоев

hBN демонстрируют перспективность такого подхода — удалось получить тонкие слои значительно большей площади по сравнению со случаем, когда поле не использовалось.

Из представленных данных следует, что возможности практической реализации метода использования электрического поля для улучшения адгезии проводящих пленок к диэлектрическим подложкам при различных способах нанесения являются весьма эффективным и несложными для использования.

### Список литературы

1. Афанасьев В.П., Чигирев Д.А., Пщелко Н.С., Сидорова Н.П. Влияние постоянного электрического поля на процесс осаждения тонких пленок платины методом ионно-плазменного распыления. Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2010. № 6. С. 59-65.
2. Нагорный В.С., Пщелко Н.С. Экспериментальное исследование способов повышения адгезии проводящих частиц к диэлектрическим подложкам. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 3 (80). С. 185-190.
3. Нагорный В.С., Пщелко Н.С. Теоретические основы повышения адгезии проводящих слоев к диэлектрическим подложкам. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 4 (82). С. 217-221.
4. Пщелко Н.С. Электрофизические методы неразрушающего контроля и формирования металлодиэлектрических структур. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный университет. Санкт-Петербург, 2011
5. Пщелко Н.С., Сырков А.Г., Вахренёва Т.Г., Пантюшин И.В., Сырков Д.А. Электрофизические и химико-физические микро-и нанотехнологии усиления адгезии компонентов в системе металл-диэлектрик. Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 11-12. С. 42-47.
6. Пщелко Н.С., Стоянова Т.В. Влияние шероховатости поверхностей электроадгезионного контакта на его силовые характеристики. Цветные металлы. 2008. № 5. С. 51-57.
7. Пщелко Н.С. Поляризация приповерхностных слоев ионных диэлектриков на границе электроадгезионного контакта с проводником. Цветные металлы. 2005. № 9. С. 44-50.
8. N. Pavliuk, E. Cherskikh, N. Pshchelko and A. Shabanova. Circuit Schematics of a Capacitive Proximity Sensor. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019. P. 486-490/ doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947597.
9. Pshchelko N.S., Sevryugina M.P. Modeling of physical and chemical processes of anodic bonding technology. Advanced Materials Research. 2014. V. 1040. P. 513-518.
10. Pshchelko N.S. Interlayer polarization of ionic dielectrics at anodic bonding process with a conductor surface. Non-Ferrous Metals. 2006. № 4. С. 27-31.
11. Pshchelko N., Vodkailo E. Features of Electrostatic Fields and Their Force Action When Using Micro- and Nanosized Inter-Electrode Gaps // Materials 2020, V.13, №24, P. 1-19; <https://doi.org/10.3390/ma13245669>

## ИЗМЕРЕНИЯ ДИОДОВ С S-ОБРАЗНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ВИРТУАЛЬНЫМ ПРИБОРОМ НА БАЗЕ NI PXI

Л.И. ИВКИН, Г.Е. ЯКОВЛЕВ, В.И. ЗУБКОВ

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

**Аннотация.** В данной статье приводится теоретическое обоснование физических процессов, происходящих в S-приборах. Объясняются особенности характеристик таких приборов. Приводится описание установки, на которой производились измерения для изучения S-диода на основе кремния, легированного золотом, а также результаты проведенных измерений и выводы по ним.

**Ключевые слова:** S-прибор, диод, вольт-амперная характеристика, PXI, LabVIEW.

С развитием электроники появилась возможность использовать новые типы приборов, используя различные физические явления. Одним из таких типов являются S-приборы, принцип работы которых основан на наличии участка отрицательного дифференциального сопротивления на вольт-амперной характеристике (ВАХ). Диоды с такой ВАХ могут использоваться в качестве фотоприемников, датчиков температур, переключателей, элементов памяти и др., чем и вызван интерес изучения характеристик S-диодов. **Целью данной работы** являлось исследование характеристик S-диода на основе кремния, легированного золотом, а именно, построение вольт-амперной характеристики диода.

S-приборы: теория и практическое применение. S-приборы — это приборы, вольт-амперная характеристика (ВАХ) которых характеризуется наличием участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением  $R_d$ . На рис. 1 участок отрицательного дифференциального сопротивления находится между значениями остаточного  $I_{ост}$  и тока срыва  $I_{ср}$ . На этом участке с ростом напряжения ток уменьшается [1,2].

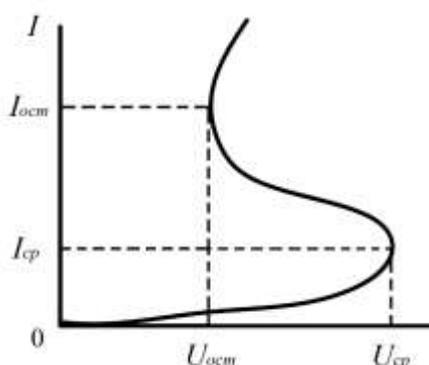


Рис. 1. Теоретический вид S-образной вольт-амперной характеристики.

В приборе с S-образной ВАХ каждому значению тока соответствует одно значение напряжения, но при этом одному значению напряжения может соответствовать до трех значений тока, поэтому такой прибор называют прибором, управляемым током. В этих приборах имеется внутренняя положительная обратная связь по току, так как на участке отрицательного дифференциального сопротивления значение тока увеличивается. Положительная обратная связь создает сдвиг фаз между током и напряжением и ток запаздывает от напряжения. Поэтому в S-приборах реактивная составляющая полного сопротивления носит индуктивный характер.

Особенности S-образной ВАХ. Механизм возникновения отрицательного дифференциального сопротивления заключается в перераспределении внешнего напряжения между базой и *p-n*-переходом. С увеличением тока через диод растет инжекция носителей заряда в базу и уменьшается ее сопротивление. Поэтому доля напряжения, падающего на базе, уменьшается, а доля напряжения, падающего на *p-n*-переходе, возрастает. Из-за увеличения напряжения на *p-n*-переходе растет концентрация инжектированных носителей в базе диода, уменьшается сопротивление базы, перераспределяется напряжение и т. д. Но с увеличением тока сопротивление *p-n*-перехода тоже растет и поэтому появление положительной обратной связи возможно только при уменьшении сопротивления базы сильнее уменьшения сопротивления *p-n*-

перехода. Такое возможно при условии, когда проводимость базы увеличивается не только за счёт инжекции, а ещё и за счёт дополнительных механизмов [3].

Примеры таких механизмов: увеличение времени жизни инжектированных носителей заряда с ростом их концентрации, увеличение подвижности инжектированных носителей в компенсированном полупроводнике, изменение коэффициента инжекции  $p$ - $n$ -перехода, тепловой механизм образования отрицательного сопротивления и т. п. [4].

Диоды с S-образной ВАХ могут применяться в различных областях. Так, ввиду необычных оптических свойств S-диоды нашли применение в качестве фотоприемников для видимой и инфракрасной областей спектра. Эти свойства диодов связаны с тем, что свет может изменять концентрацию и распределение носителей зарядов в базовой области диода. Используя зависимость частоты генерации от температуры S-диодов, можно создавать датчики температуры на их основе. Помимо датчиков S-диоды используются и в других устройствах, таких как генератор гармонических колебаний, релаксационный генератор, переключатель и др.

**Исследуемые образцы.** Исследовались характеристики диода на основе кремния, легированного алюминием и золотом. Исходная пластина полупроводникового кремния с  $n$ -типом проводимости выращивалась методом бестигельной зонной плавки. Далее в исходные пластины проводилась диффузия акцепторной примеси (алюминий) для формирования  $p$ - $n$  перехода. После этого в пластины проводилась диффузия атомов золота, обладающего высокой скоростью диффузии в кремнии, благодаря чему оно достаточно равномерно распределяется на всю глубину образца.

В противоположность рекордному коэффициенту диффузии, золото обладает низкой степенью растворимости в кремнии, поэтому оно не может полностью скомпенсировать основную легирующую примесь, но при этом создает относительно высокую концентрацию глубоких уровней вблизи середины запрещенной зоны кремния [5]. Золото создает в кремнии сразу два глубоких уровня вблизи центра запрещенной зоны.

Экспериментальные результаты. Измерения проводились с использованием оборудования на базе модульной платформы NI PXI. Данная модульная платформа (рис. 2) позволяет создавать автоматизированные измерительные и испытательные комплексы. PXI содержит шасси, в которое устанавливаются модули, представляющие из себя приборы, контроллеры или интерфейсы для удаленного управления платформой. Управление приборами осуществлялось в автоматическом режиме при помощи программы, написанной на языке графического программирования NI LabVIEW [6].



Рис. 2. Модульная платформа PXI.

Для получения ВАХ диода использовались 2 модуля, устанавливаемых в PXI: PXI-4072 и PXI-4110. PXI-4072 — это модуль, объединяющий в себе функционал трех

приборов — цифрового мультиметра, RLC метра и дигитайзера. В данной работе РХИ-4072 использовался в качестве цифрового мультиметра. РХИ-4110 — это высокоточный стабилизированный источник постоянных напряжения и силы тока.

Измерения ВАХ проводились по следующей электрической схеме (рис. 3): на кремниевый диод подавался ток с источника питания (РХИ-4110), параллельно диоду подключался конденсатор с выбранной емкостью, последовательно им включался нагрузочный резистор. Напряжение на диоде измерялось с помощью цифрового вольтметра РХИ-4072.

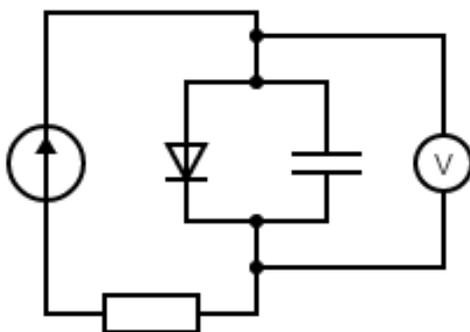


Рис. 3. Схема измерения.

С источника тока подавался постоянный ток. С вольтметра снимались показания и по полученным данным были построены ВАХ при различных нагрузочных сопротивлениях. Для получения S-образной ВАХ образца аналитически вычиталось падение напряжения на нагрузке ( $I \cdot R_H$ ), ВАХ до вычета этого падения напряжения представлена на рис. 4. На полученных зависимостях можно наблюдать участки отрицательного дифференциального сопротивления (рис. 5, 6). Появление этих участков связано с медленной перезарядкой глубокой примеси золота.

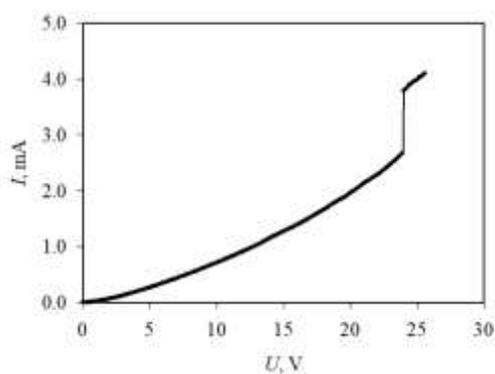


Рис. 4. ВАХ диода при  $R_H = 3.8 \text{ кОм}$  до вычета падения напряжения на нагрузке.

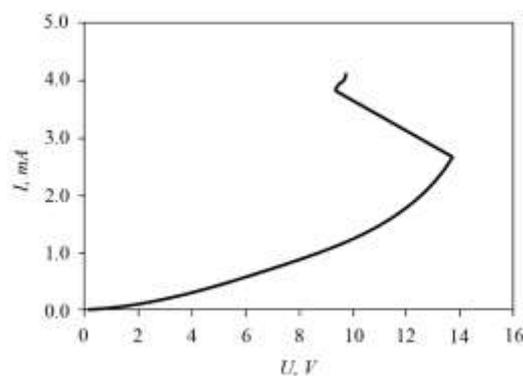


Рис. 5. ВАХ диода при  $R_H = 3.8 \text{ кОм}$  после вычета падения напряжения на нагрузке.

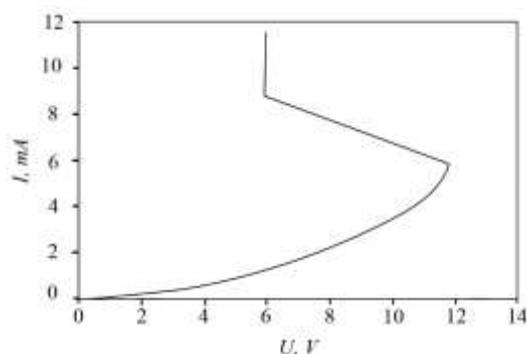


Рис. 6. ВАХ диода при  $R_H = 2 \text{ кОм}$ .

**Выводы.** В ходе данной работы была собрана установка для измерений характеристик диода на основе модульной платформы РХІ. Проведены измерения и построены S-образные ВАХ диода на основе кремния, легированного золотом. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что S-образная ВАХ является полностью воспроизводимой только при неизменности условий эксперимента и зависит от величины нагрузочного сопротивления. Это является следствием лавинообразных физических процессов, связанных с перезарядкой глубоких центров золота, которое приводит к резонансному перераспределению падения напряжений на ООЗ и области квазинейтральности диода.

### Список литературы

1. Викулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1990.-264 с.: ил.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. Кн. 1 / М.: Мир, 1984. 456 с.
3. В. D. Н. Tellegen (1972) Stability of negative resistance, International Journal of Electronics, 32:6, 681-686
4. С. Г. Новиков, Н. Т. Гурин, А. В. Беринцев, В. А. Родионов, А. А. Штанько Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольт-амперной характеристике, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 15, №6, 2013
5. U. Gosele, W. Frank, A. Seeger. Mechanism and kinetics of the diffusion of gold in silicon. Appl. Phys. — 1980. — Vol. 23. — pp. 361-368.
6. Зубков В. И., Соломонов А. В. Компьютерные технологии в научных исследованиях: Учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИК ФУРЬЕ СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ

А.В. Ильин

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

**Аннотация.** Статья посвящена созданию прибора, основанном на ИК Фурье спектрометре для дистанционного анализа промышленных и природных объектов. В частности, целью работы является создание системы, позволяющей автоматически производить физико-химический анализ газов. Приводится описание основных технологий ИК спектрометрии, произведён обзор используемого инструментария и разработана функциональная схема прибора для реализации минимальной жизнеспособной модели.

**Ключевые слова:** ИК Фурье спектрометр, дистанционный анализ, мониторинг газов, контроль промышленных производств.

Большинство промышленных предприятий в результате своей работы потребляют или производят газы разной степени опасности. Как известно, большинство газов очень летучи и не видимы человеческим глазом, соответственно, это затрудняет анализ наличия и движения масс, а также увеличивает опасность для человека. Как следствие, отслеживание утечек газов весьма трудоёмкое и опасное мероприятие. Например, высокая концентрация определенных веществ в воздухе, таких как углекислый газ, метан, водород, различие которых для нас представляется в виде разной поглощающей и излучающей способности в ИК диапазоне. Все эти вещества, если повысить их содержание в окружающем воздухе (в некоторых случаях даже незначительно), могут отрицательно влиять на состояние человека.

Анализ газов из труб предприятий так же является сложной задачей из-за высоты проведения исследования и малого количества места для размещения оборудования. Проблемным так же является проверка трубопроводов на поверхности земли и под землёй из-за их протяженности.

Методика измерений основана на анализе инфракрасного свечения объекта исследования, прошедшего через интерферометр Майкельсона, и последующей интерференции самого на себя за счёт изменения оптического пути подвижным зеркалом. Как следствие мы получаем интерференционную картину рис. 1, которую преобразуем в спектр излучения преобразованием Фурье [1]. В данном способе измерения источником ИК излучения служит солнечный свет. Изменение характеристик которого, за счёт прохождения через газы, мы регистрируем и получаем информацию об объекте исследования.

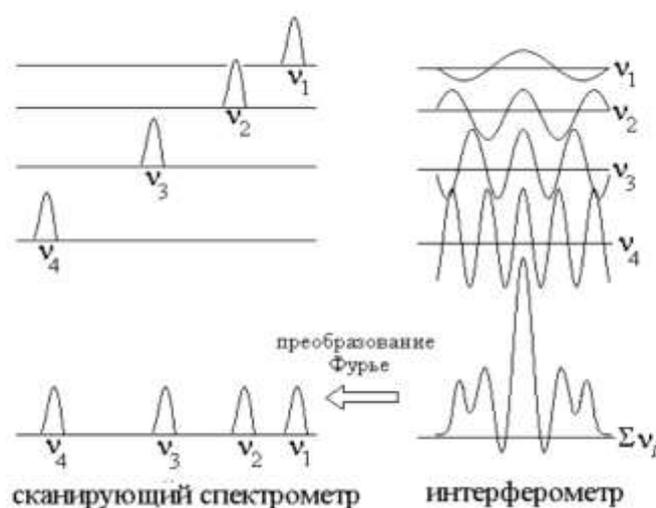
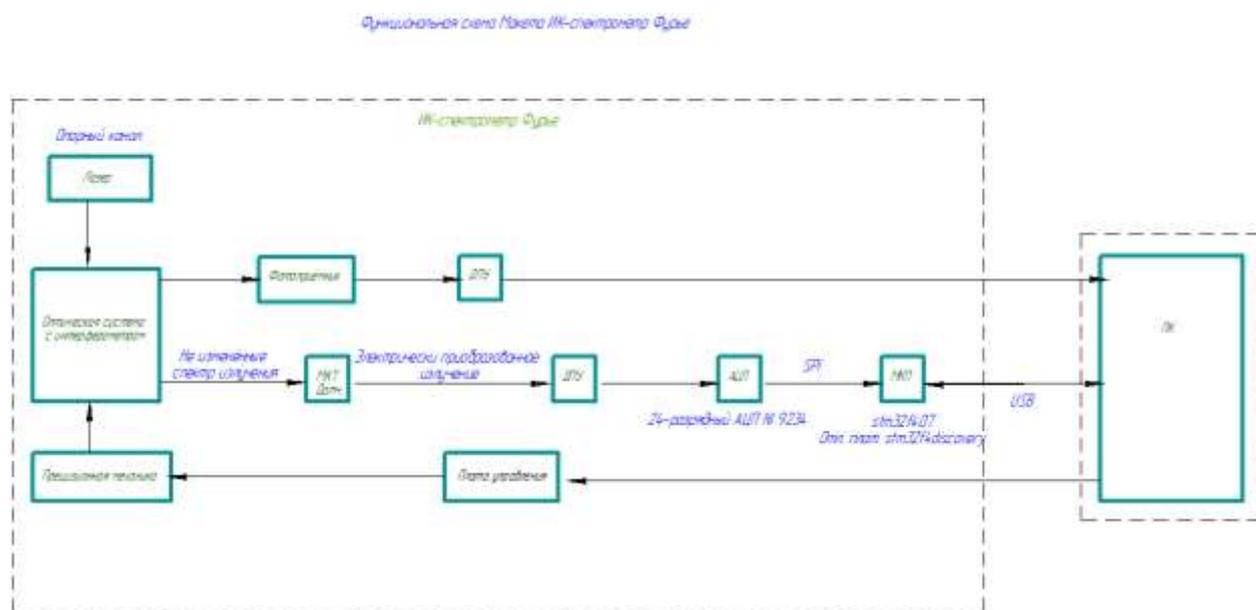


Рис. 1. Сравнение сигналов, получаемых с помощью сканирующего спектрометра и интерферометра.

В современном мире все большее количество производств переходит к более пристальному контролю внутренней системы и уменьшению выбросов в среду. Быстрый и качественный анализ газов поможет увеличить количество получаемых данных и улучшит оперативность исследований. Эти данные позволяют определять количественные и качественные характеристики выбросов и утечек, для дальнейшего улучшения безопасности

предприятий. По официальным источникам, протяженность магистральных трубопроводов России составляет 217 тыс. км, в том числе 151 тыс. км газопроводных магистралей, 46,7 тыс. км нефтепроводных, 19,3 тыс. км нефтепродуктопроводных. По магистральным трубопроводам перемещается 100% добываемого газа, 99% нефти, более 50% продукции нефтепереработки. В общем объеме грузооборота трубопроводного транспорта доля газа составляет 55,4%, нефти — 40,3%, нефтепродуктов — 4,3%. Также на начало 2019 г. в России было 309 846 промышленных предприятий. Из них на 306 338 заводах численность сотрудников превышала 250 человек. Кроме этого, добычей полезных ископаемых занималось 17 161 комбинатов, а обеспечением электрической энергией, газом и пр. — 22 520 объектов, водоснабжением и утилизацией отходов — 26 123. За 2019 г. открылось новых 650 предприятий, за 2020 г. — как минимум 318.

При разработке системы дистанционного анализа использовались технологии космического ИК зондирования [2]. На основе данного прибора была построена функциональная схема прибора рис. 2.



*МПК – микропроцессор на отладочной плате*

*АЦП – Аналого-цифровой преобразователь*

*ДПЧ – Дифференциальный предварительный усилитель*

Рис. 2. Функциональная схема ИК Фурье спектрометра.

Большое количество технологий, используемых для получения спектра при помощи интерферометра Майкельсона, передачи и обработки сигнала. Для преобразования данных в реальном времени особо важную роль играет преобразование Фурье. При разработке системы использовалась технология преобразования оптического сигнала в цифровой [2], которая позволила получить наглядную информацию, анализ и вывод статистики в удобном формате. Предлагается аппаратная часть, представляющая собой модуль исследования среды, способный самостоятельно строить спектрограмму и выводить

полученные результаты на экран о наличии тех или иных газов в среде, исходя из получаемых данных. Ключевой частью узла управления движением подвижного зеркала является микроконтроллер stm32f407 от STmicroelectronics, расположенный на отладочной плате stm32f4discovery. В качестве приёмника излучения прошедшего через интерферометр Майкельсона выступает фотодиод OPT101P. Использование подобных компонентов даёт нам величину спектрального разрешения порядка 5000, что позволяет фиксировать вещества, массовая доля которых превышает 10-15% в м<sup>3</sup>.

Программа микроконтроллера выполняет измерение длительности каждого периода меандра, сравнение с эталонным значением, равным 1,5 мс, и нахождение их разности — ошибки стабилизации. Полученная разность является входным параметром системы управления движением уголкового отражателя. Основой обрабатывающей части устройства является плата raspberry pi с дополнительным модулем для определения географических координат. В штатном режиме работы устройство собирает информацию от ИК датчика в таблицу, и производит Фурье-преобразование, раскладывая в спектр оптический луч, где информация представляется пользователю в читаемом виде.

В приборе присутствует опорный канал с гелий-неоновым лазером, в качестве идеального источника. В случае получения ошибки или неисправности одной из частей системы, устройство посылает текстовое уведомление.

Программная часть представляет собой программу, написанную в MATLAB, пересылающая спектрограмму и демонстрирующая пользователю оповещения. Полученные данные формируются в отдельные отчёты с уникальным номером и проставленными метаданными о времени и месте проведения замеров.

### Список литературы

1. Тарасевич Б. Н. Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК спектроскопии // М.: МГУ. — 2012.
2. Мошкин Б. Е. и др. ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ РАБОТЫ НА МАРСЕ // Приборы и техника эксперимента. — 2019. — №. 2. — С. 109-113.
3. Егоров А. С. Инфракрасная фурье-спектроскопия // Эл. учеб.-метод. пособие.[Эл. ресурс] / Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. — 2012.
4. Крылов А. С., Втюрин А. Н., Герасимова Ю. В. Обработка данных инфракрасной Фурье-спектроскопии. методическое пособие // Красноярск, Институт физики СО РАН. — 2005.
5. Завелевич Ф. С. и др. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — Т. 3. — №. 1. — С. 224-230.
6. Бондарь С. Н., Хорольский В. Я., Бондарь М. С. Аналого-цифровой преобразователь. — 2006.

## ЭФФЕКТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ТОНКИХ СЛОЕВ ZnO НА ПОВЕРХНОСТИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.Е.КЕМЕЛБЕКОВА, Д.М.МУХАМЕДШИНА, Д.О.МУРЗАЛИНОВ, Н.В. ИДРИСОВ

*Satbayev University, Физико-технический институт, Алматы*

**Аннотация.** Целью данной работы была идентификация структур различного масштаба в результате порообразования кремния и после нанесения покрытия на основе ZnO. Были получены образцы пористого кремния, на образцы были нанесены пленки оксида цинка методом спрей-пиролиза.

**Ключевые слова:** пористый кремний, наностержни ZnO, нанокластеры.

Эффекты самоорганизации низкоразмерных систем на поверхности твердого тела при образовании периодически упорядоченных структур имеют высокий интерес [1-3]. Это связано с тем, что процесс определяется квантовыми явлениями [4-7], предполагающими новые подходы к пониманию природы формирования вещества [8].

Пористый материал интересен с точки зрения использования внутреннего объема в качестве нанореакторов для синтеза различных наночастиц. Пространственное разделение снижает влияние эффекта агрегации наночастиц. Управляя формой и размерами каналов, возможно исследовать различные наноразмерные материалы с заданными геометрическими размерами и формой.

Пористый кремний перспективен в качестве матрицы-носителя благодаря тому, что размерами и конфигурацией пор можно управлять в широких диапазонах путем вариации технологических условий [9-13]. Наностержни ZnO, интегрированные с кремниевыми подложками, предложены в качестве компонентов различных полупроводниковых устройств.

Нанослой  $\text{por-Si}$  были получены методом электрохимического анодного травления. Реализован процесс одно- и двухступенчатого анодирования с изменением плотности тока  $J$  и времени анодирования  $t$ .

Покрытие на основе ZnO наносилось методом спрей пиролиза. Структура поверхности образцов без нанесения покрытия, с покрытием 20 и 25 слоев изучались методом атомно-силовой микроскопии.

**Целью данной работы** была идентификация структур различного масштаба в результате порообразования кремния и после нанесения покрытия на основе ZnO.

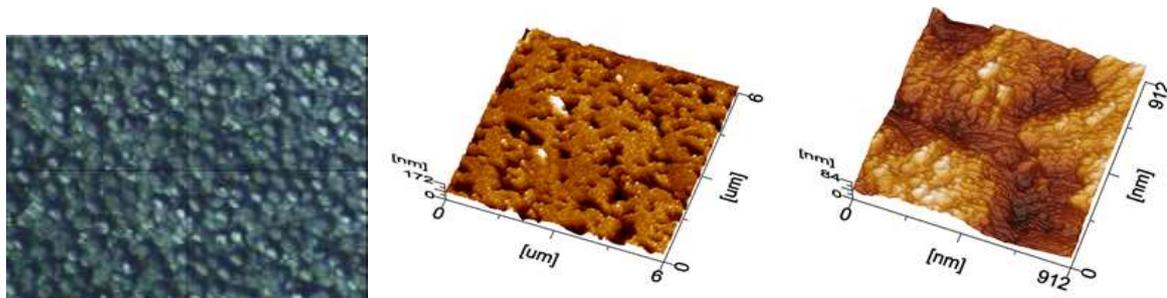


Рис. 1. АСМ изображения, различного масштаба Por-Si без нанесения покрытия.

Поверхность образца без нанесения пленки, при увеличении в оптическом микроскопе, имеет макропористую структуру. Морфология поверхности однородная. На снимке в масштабе 25 на 25 мкм, заметны более мелкие регулярные образования. Это подтверждается при выборе масштаба 6 на 6 мкм.



Рис. 2. АСМ изображения, различного масштаба Por-Si с нанесением 20 слоев покрытия на основе ZnO.

При нанесении 20 слоев покрытия оптическая микроскопия показывает уменьшение размеров макропор. На снимке 25 на 25 микрон так же заметны регулярные образования. При увеличении масштаба до 1,5 на 1,5 мкм обнаружено, что образования в основном имеют одинаковую пространственную ориентацию. Увеличение 500 на 500 нм позволило идентифицировать нанокластеры кремния.

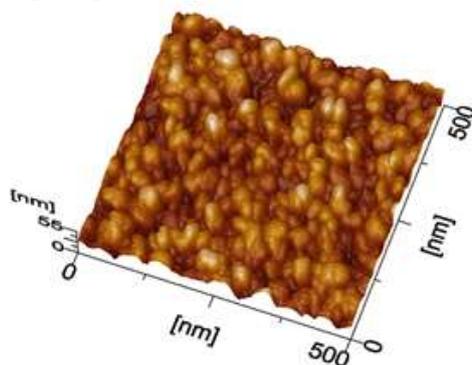


Рис. 3. АСМ изображение, *Por-Si* с нанесением 25 слоев покрытия на основе *ZnO*.

Нанообразования пор и кластеров были идентифицированы на поверхности образцов, после нанесения 25 слоев покрытия, при увеличении 500 на 500 нм.

Наличие нескольких уровней пористости влияет на механизм роста, морфологию, фазообразование и другие свойства синтезируемой в порах фазы.

Возможные механизмы роста пленки оксида цинка, обсуждаемые в работе [14], схематически визуализированы на рисунке 4.

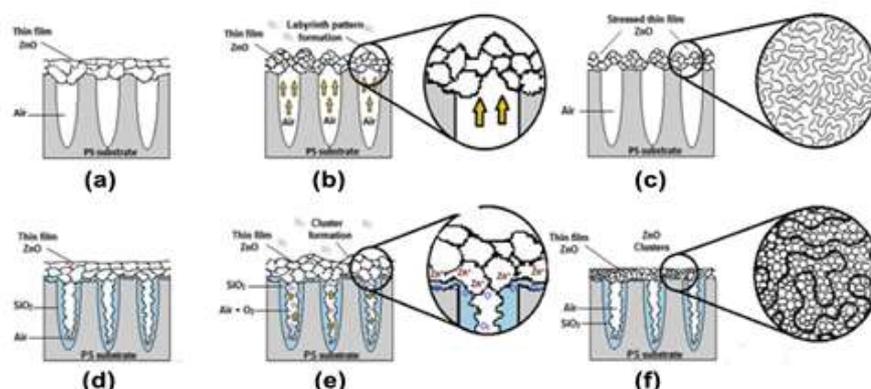


Рис. 4. Механизм роста различных микроморфологий оксида цинка на пористой кремниевой подложке. (a–c)

Соответствуют этапам, связанным с осаждением и развитием образования зернистого лабиринтного рисунка на неокисленной подложке; (d–f) соответствуют этапам, связанным с осаждением *ZnO* на окисленной подложке с относительно небольшими порами. [14]

Таким образом показано, что методом электрохимического анодного травления на поверхности кремния образованы макропоры, включающие в себя наноразмерные поры. Нанесение 20 слоев покрытия на основе оксида цинка формирует нанокристаллы кремния. При увеличении слоев до 25, образуются как кластеры, так и поры наноразмерного масштаба.

### Благодарности

Данное исследование финансировалось по программе № AP09058002 «Исследование свойств динамической памяти на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$  и формирование нанокластеров

кремния с повышенной интенсивностью фотолюминесценции» Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

### Список литературы

1. N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, S. V. Ivanov, B. Ya. Mel'tser, M. V. Maksimov, P. S. Kop'ev, D. Bimberg, and Zh. I. Alferov, *Phys.—Usp.* 39 (4), 393 (1996)
2. N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, V. A. Shchukin, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, and D. Bimberg, *Semiconductors* 32 (4), 343 (1998)
3. V. I. Emel'yanov, *Kvantovaya Elektron. (Moscow)* 36, 489 (2006)
4. A. F. Andreev and A. Ya. Parshin, *Sov. Phys. JETP* 48(4), 763 (1978)
5. V. I. Marchenko and A. Ya. Parshin, *Sov. Phys. JETP* 52(1), 129 (1980)
6. V. I. Marchenko, *JETP Lett.* 33 (8), 381 (1981)
7. A. F. Andreev and Yu. A. Kosevich, *Sov. Phys. JETP* 54(4), 761 (1981)
8. K.B. Tynyshtykbayev, Yu.A. Ryabikin, K.A. Mit', B.A. Rakymetov, T. Aitmukan, Dynamics of Formation of the Mosaic Structure of Porous Silicon during Prolonged Anodic Etching in Electrolytes with 2011, published in *Fizika Tverdogo Tela*, 2011, Vol. 53, No. 8, pp. 1498–1504
9. Smerdov R.S., Mustafaev A.S., Spivak Y.M., Moshnikov V.A. Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems// В сборнике: *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. С. 012038
10. Бобков А.А., Лашкова Н.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Налимова С.С. Получение гетероструктурных оксидных композиций для перспективных солнечных элементов нового поколения// *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. № 1. С. 63-67
11. Bobkov A.A., Lashkova N.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A., Nalimova S.S. Fabrication of oxide heterostructures for promising solar cells of a new generation *Semiconductors*. 2017. Т. 51. № 1. С. 61-65
12. Исследование, технология и использование нанопористых носителей лекарств в медицине. Под ред. Шевченко В.Я., Киселев О.И., Соколов В.Н., Санкт-Петербург, Химиздат 2015.
13. Spivak Yu.M., Myakin S.V., Moshnikov V.A., Panov M.F., Belorus A.O., Bobkov A.A. Surface functionality features of porous silicon prepared and treated in different conditions *Journal of Nanomaterials*. 2016. Т. 2016. С. 2629582
14. L. Martínez et al. / *Superlattices and Microstructures* 67 (2014) 72–81, <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.12.008>

## ИСТОЧНИКИ УЗКОПОЛОСНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА

И. К. Киндюшов<sup>1</sup>, К. Н. Пунегова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской Академии Наук*

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

**Аннотация.** В данной работе исследуются структуры оксида цинка, синтезированные гидротермальным методом на кремниевой подложке с ориентацией (111). Продемонстрирован эффективный протокол синтеза микроструктур оксида цинка с низким аспектным отношением характерного продольного размера к поперечному. Оптические свойства полученных структур исследовались методом спектроскопии фотолюминесценции. Показана возможность синтеза низко дефектных гидротермальных микроструктур оксида цинка, пригодных для создания узкополосных источников УФ излучения, а также лазерных источников излучения на основе мод шепчущей галереи.

**Ключевые слова:** оксид цинка, гидротермальный синтез, УФ-излучение

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 2020-00011

## I. Введение

Оксид цинка (ZnO) широко зарекомендовал себя в качестве материала современной электроники. Известны эффективные пьезонаногенераторы, газовые сенсоры, и оптические приборы на основе структур оксида цинка различной модификации [1–5]. Помимо большой величины ширины запрещенной зоны (3.37 эВ при комнатной температуре), заметным свойством ZnO также является высокая энергия связи экситона (60 мэВ). Подобные особенности свидетельствуют о возможности сохранения экситонных эффектов в ZnO как при низких, так и при комнатной температуре и выступать в качестве относительно недорогого и эффективного источника УФ излучения[6].

Оксид цинка в геометрии гексагональных микрокристаллов представляет из себя резонаторную структуру и может быть использован для генерации лазерного излучения, в том числе и мод шепчущей галереи (МШГ). Технология производства ZnO относительно проще и технологичнее, чем у современных аналогов [7-9]. Кроме того, ZnO — биологически, химически и радиационно стабилен, а также нетоксичен для организма человека. Несмотря на то, что существует большое количество светоизлучающих приборов на основе различных материалов [10–12], низкодефектные микроструктуры ZnO, синтезируемые относительно дешёвым и технологичным гидротермальным методом, имеют большую перспективу для решения задач современной фотоники и нанoeлектроники.

## II. Синтез структур оксида цинка

Гидротермальный синтез — это метод получения различных материалов и соединений, основанный на использовании физических и химических процессов, протекающих в водных растворах при повышенных температурах. К преимуществам гидротермального синтеза можно отнести широкие возможности управления условиями роста, возможность проводить синтез при относительно низких температурах (менее 100°C), что приводит к значительному снижению энергозатрат и делает метод достаточно экономичным.

В настоящей работе кремниевые подложки Si (111) используются для гидротермального синтеза наноструктур ZnO. Ацетат цинка используется в качестве материала затравочного слоя. Ростовой раствор состоит из эквимолярных водных растворов  $Zn(NO_3)_2$  и гексаметилентетрамина (НМТА).

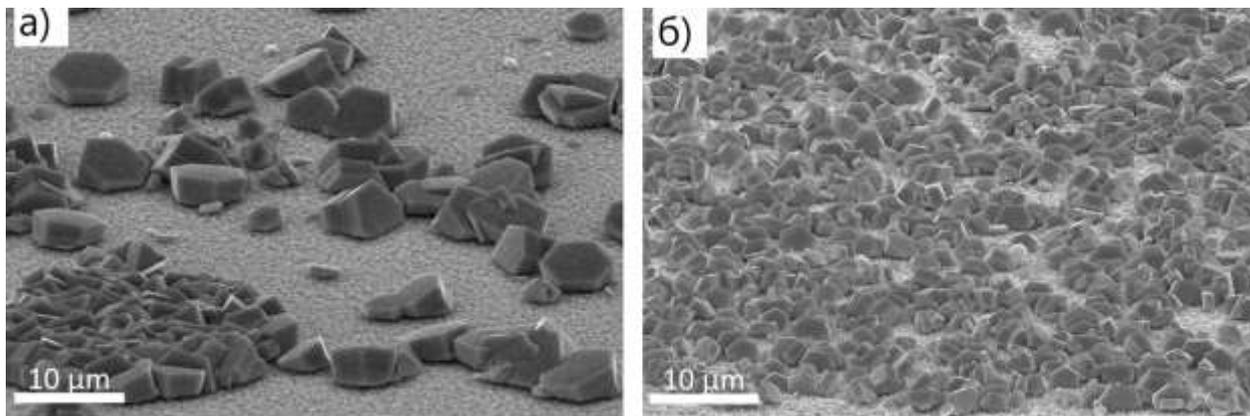


Рис. 1. СЭМ-изображение а) образец №1; б) образец № 2.

Образец № 1 на (рис. 1(а)) был синтезирован на кремниевой подложке с 10 затравочными слоями, нанесенными методом центрифугирования, в ростовой раствор добавлялся цитрат натрия (концентрация 5 мМоль/л. Концентрация водных растворов  $Zn(NO_3)_2$  и НМТА — 100 мМоль/л). Отрицательно заряженные ионы цитрата натрия избирательно связываются с ионами  $Zn^{2+}$  на поверхности (0001) и подавляют рост в вертикальном направлении, стимулируя латеральный рост в направлениях  $[01\bar{1}0]$  или  $[21\bar{1}0]$ . Этот процесс приводит к формированию структур оксида цинка в форме шестигранных микрокристаллов гексаподов с диаметром порядка  $D \sim 7\text{--}10$  мкм, и высотой  $\sim 3$  мкм.

Образец № 2 (рис. 1(б)) был синтезирован на кремниевой подложке с одним затравочным слоем, нанесенным silag методом. В качестве затравочного слоя был использован водный раствор ацетата цинка в концентрации 5 мМоль/л. На подложку наносилась капля раствора объемом 0.5 мл. Высыхание капли проходило при комнатной температуре. Концентрация водных растворов  $Zn(NO_3)_2$  и НМТА — 100 мМоль/л.

В результате синтеза были получены разориентированные шестигранные микрокристаллы с диаметром порядка 3–5 мкм. Объем активной среды на поверхности подложки выше, чем у образца №1.

### **III. Исследование оптических свойств.**

#### **3.1. Оборудование и техника.**

Оптические свойства, зонная структура и процессы рекомбинации, важные для исследования приборной применимости синтезированных наноструктур, были изучены путем регистрации и анализа низкотемпературных спектров фотолюминесценции (ФЛ). Спектры ФЛ исследовались с использованием монохроматора MDR-204-2 (LOMO Photonics). Образцы помещали в гелиевый криостат замкнутого цикла (Janis Research Company), поддерживавший температуру 10К. Возбуждение ФЛ осуществлялось He-Cd (длина волны возбуждения  $\lambda = 325$  нм, максимальная мощность излучения  $W = 50$  кВт/см<sup>2</sup>) лазером. Температура образца — 10 К. Для простоты анализа спектры снимались при возбуждении ФЛ в разных частях образца. Было обнаружено, что интенсивность ФЛ может незначительно меняться от точки к точке, но спектр ФЛ остается неизменным.

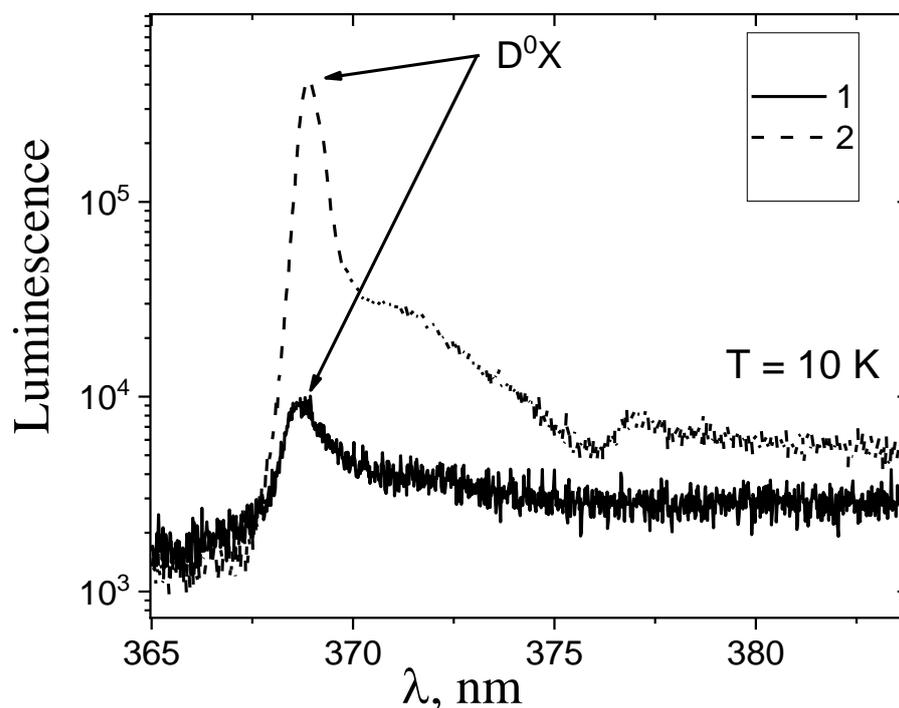


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции для двух синтезированных образцов.

### 3.2. Результаты фотолюминесцентной спектроскопии

В ходе работы были получены спектры ФЛ (рис. 2). В спектральную область коротковолновой полосы ФЛ при низких температурах попадает излучение, содержащее линии связанных на мелких нейтральных и ионизованных донорах экситонов ( $D^0X$ ).

Для оксида цинка характерно излучение ФЛ во всех областях спектра от УФ до ИК [13]. Пики вне УФ-области обусловлены наличием дефектов и примесей в структуре ZnO [12]. Отсутствие отклика ФЛ в длинноволновой области указывает на высокое кристаллическое совершенство синтезированных наноструктур.

Установлено, что интенсивность ФЛ в основном определяется объемом активной среды на поверхности подложки.

### IV. Заключение

В этой работе мы синтезировали микроструктуры ZnO гидротермальным методом с добавлением цитрата натрия в ростовой раствор. Полученные структуры имеют форму гексапедов. Исследованы спектры ФЛ синтезированных наноструктур при низкой температуре, свидетельствующие о наличии узкой полосы излучения вблизи 370 нм, а также об отсутствии отклика ФЛ в видимой области спектра. Показано, что межзонная рекомбинация подавлена за счет высокой кристалличности структур.

Дальнейшее исследование синтезированных наноструктур ZnO методом спектроскопии микрофотолюминесценции позволит сделать выводы об их резонансных оптических свойствах и перспективах их использования в нанофотонных устройствах.

### Список литературы

1. V M Kondratev / Technologically Feasible ZnO Nanostructures for Carbon Monoxide Gas Sensing // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, 1163.

2. E A Levkevich, A I Maksimov, S A Kirillova, S S Nalimova, V M Kondrat'ev and A. A. Semenova / Synthesis, Investigation and Gas Sensitivity of Zinc Stannate Layers // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020, 984.
3. S S Nalimova, V M Kondratev, A A Ryabko, A I Maksimov and V A Moshnikov / Study of sensor properties of zinc oxide based nanostructures // J. Phys.: Conf. Ser., 2020, 1658 012033.
4. S S Nalimova, A A Bobkov, V M Kondrat'ev, A A Ryabko, V A Moshnikov and Z V Shomakhov / Study of Doped Zinc Oxide Nanowires by X-Ray Photoelectron Spectroscopy // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020, 991.
5. S S Nalimova and V M Kondrat'ev / Study of Surface Acid-Base Properties Of Gas-Sensitive Metal Oxides // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020, 987.
6. S. A. Kadinskaya, V. M. Kondratev, I. K. Kindyushov, A. Kuznetsov and K. N. Punegova, «Hydrothermal ZnO-based Nanostructures: Geometry Control and Narrow Band UV Emission,» 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 958-961.
7. Жуков А Е, Моисеев Е И, Надточий А М и др. / Лазерная генерация перенесенных на кремний инжекционных микродисков с квантовыми точками InAs/InGaAs/GaAs/ Письма в ЖТФ, 2020, 46(16), 783-786.
8. Kuznetsov, N. Fominykh, V. Kondratev and S. V. Fedina, «GaP Nanowire Waveguides,» 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1126-1129.
9. V. M. Kondratev, A. Kuznetsov, V. O. Gridchin, S. V. Fedina and K. Aubekerov, «III–V Nanowires for Biological Ammonia Concentrations Detection,» 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 970-974
10. Bolshakov A D, Shishkin I, Machnev A, Petrov M, Kirilenko D A, Fedorov V V, Mukhin I S, Ginzburget P / Single GaP nanowire nonlinear characterization with the aid of an optical trap // Nanoscale 2022, 14(3), 993.
11. Kuznetsov A, Roy P, Kondratev V M, Fedorov V V, Kotlyar K P, Reznik R R, Vorobyev A A, Mukhin I S, Cirlin G E, Bolshakov A D / Anisotropic Radiation in Heterostructured «Emitter in a Cavity» Nanowire // Nanomaterials 2022, 12(2), 241.
12. P Roy, A D Bolshakov / A Highly Directive Ultraviolet Plasmonic «Antenna-on-Reflector» for Single-Molecule Detection // Physica Status Solidi (RRL) — Rapid Research Letters 2021, 15(6), 2000579.
13. Galdámez-Martinez, A., Santana G., Güell F., Martínez-Alanis P. R., & Dutt A. (2020). Photoluminescence of ZnO Nanowires: A Review. Nanomaterials, 10(5), 857.

## РАЗРАБОТКА СЕНСОРНЫХ СЛОЕВ СТАННАТА ЦИНКА

В.А. КОПТЕЛОВА<sup>1</sup>, А.М. ГУКЕТЛОВ<sup>2</sup>, В.М. КОНДРАТЬЕВ<sup>3</sup>, С.С. НАЛИМОВА<sup>1</sup>, З.В. ШОМАХОВ<sup>2</sup>,  
А.И. МАКСИМОВ<sup>1</sup>

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

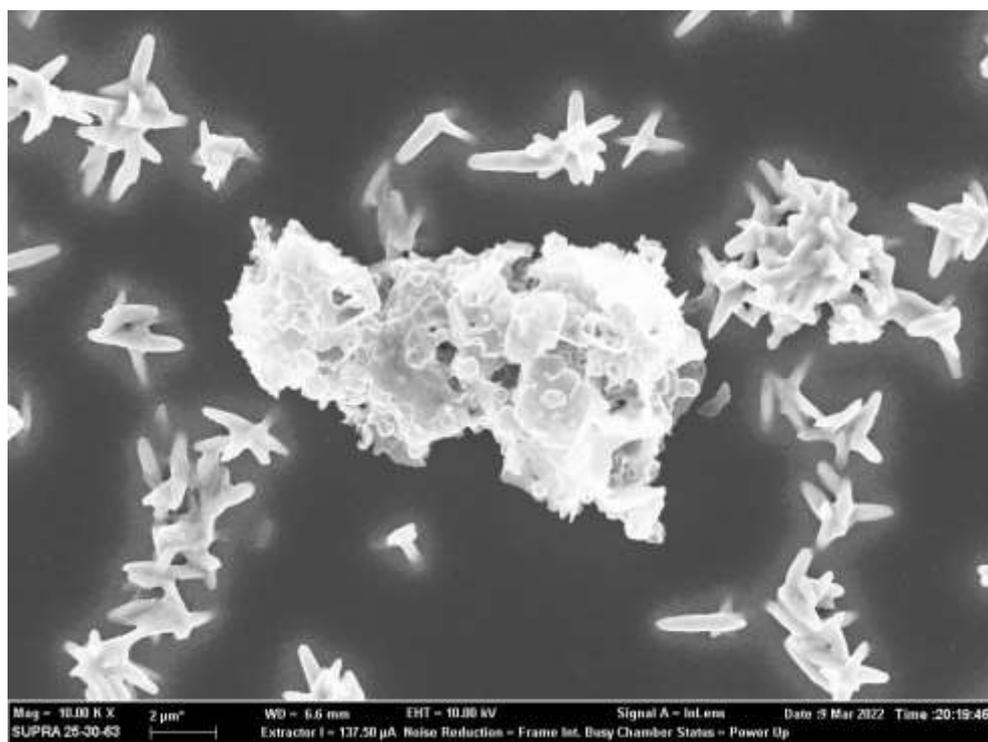
<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
г. Нальчик, Россия,

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский академический университет РАН

**Аннотация.** Работа проводилась с оксидом сложного состава ZnSnO<sub>3</sub>. Это полупроводниковый материал, имеющий электронную проводимость, он имеет высокую подвижность электронов, термически стабилен, по сравнению с оксидом цинка является более инертным, а также имеет высокую химическую активность поверхности. Благодаря своим свойствам ZnSnO<sub>3</sub> становится перспективным материалом для газовых сенсоров. [1]

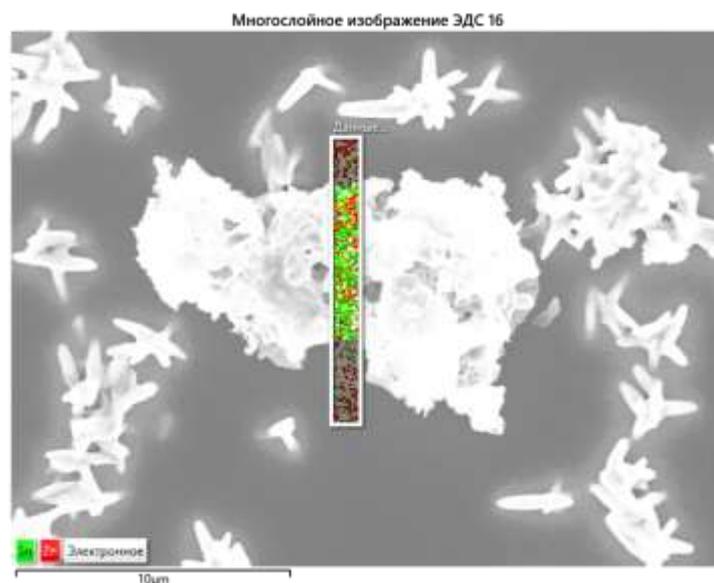
**Ключевые слова:** газочувствительность, оксид цинка, станнат цинка, детектирование паров

Выращивание ZnSnO<sub>3</sub> проводилось на поверхности наностержней оксида цинка с применением гидротермальной обработки. Для изучения морфологии поверхности образца ZnSnO<sub>3</sub> использовался метод растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фрагмент исследуемого образца представлен на рис. 2.



*Рис. 1. Морфология поверхности, исследованная методом растровой электронной микроскопии.*

Содержание цинка и олова в структуре, изображенной на рисунке 1, исследовалось методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). Результаты EDX представлены на рис. 2 и 3.



*Рис. 2. Фрагмент исследуемой области методом EDX.*



Рис. 3. Содержание: а) олова, б) цинка в фрагменте образца, исследуемого методом EDX.

Для определения состава поверхности полученных структур  $ZnSnO_3$  применялся метод рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Итоговый спектр рассматриваемой области представлен на рис. 4.



Рис. 4. Спектр структуры  $ZnSnO_3$  методом РСМА.

Полученные в настоящей работе наноструктуры состоят из неупорядоченных наностержней, морфологические особенности которых определяются условиями синтеза слоев оксида цинка. Для улучшения активности поверхности в реакциях взаимодействия с молекулами изопропилового спирта формируются структуры сложного состава, на поверхности которых, помимо ионов цинка, содержатся также ионы олова.

В проведенных экспериментах доказано, что структуры  $ZnSnO_3$  обладают большей чувствительностью к парам изопропилового спирта, по сравнению с образцами оксида цинка. Газочувствительные характеристики показаны на рис. 5.

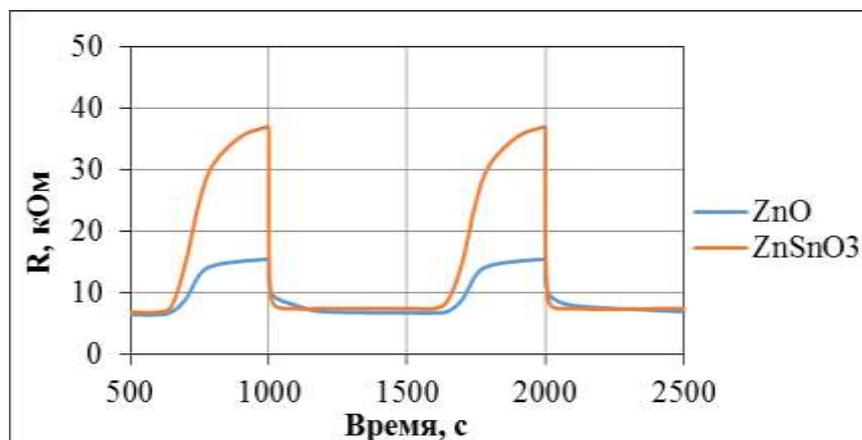


Рис. 5. Газочувствительные характеристики оксида цинка и оксида цинка и олова при  $T=310^{\circ}\text{C}$  и концентрации паров изопропилового спирта 1000 ppm.

На рис. 5 интервалы уменьшения сопротивления соответствуют подаче паров изопропилового спирта, а увеличение сопротивления происходит в момент подачи воздуха. Величина чувствительности определяется как отношения сопротивления на воздухе к величине сопротивления в присутствии паров изопропилового спирта. Из этого следует, что чувствительность образца  $\text{ZnSnO}_3$  больше чувствительности оксида цинка.

Также формирование оксидов сложного состава может сопровождаться образованием дополнительных точечных дефектов, в частности, кислородных вакансий на их поверхности, что также будет способствовать увеличению концентрации преадсорбированных ионов кислорода, а значит, увеличению отклика оксидных структур. Если при модифицировании ионами олова формирование тройного оксида происходит только на поверхности стержней оксида цинка, то может образовываться гетероструктура  $\text{Zn-Sn-O}/\text{ZnO}$ . В этом случае сенсорный отклик полученных материалов тоже может увеличиваться.

Таким образом, проведенное исследование показало, что внедрение олова в структуру оксида цинка улучшает газочувствительные свойства в случае детектирования паров изопропилового спирта.

### Список литературы

1. Налимова С.С., Максимов А.И., Матюшкин Л.Б., Мошников В.А. ФХС. — 2019. —Т. 45. № 4. — С. 311-325.
2. Рябко А.А. [и др.] ФТП. — 2020. — Т. 54. № 11 –С. 1251-1257.
3. Налимова С.С., Шомахов З.В., Мошников В.А., Бобков А.А., Рябко А.А., Калажиков З.Х. ЖТФ. 2020. Т. 90. № 7. С. 1132-1135.

## РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОЙ МОБИЛЬНОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ

Н.А. ХАРКОВЧУК, С.А. КОРЯГИН

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

**Аннотация.** В статье описывается процесс разработки автономной мобильной метеостанции Silver Station. Основным требованием для данной разработки был сбор информации о погоде

без подключения к сети Интернет, интуитивно понятное отображение, влагозащищенность по стандарту IP 56. Метеостанция собрана на микрокомпьютере Raspberry Pi 3 model B+, который использовался в качестве головного устройства. Информация о погодных условиях собиралась выносным датчиком GY-63 MS5611 и загружалась в головное устройство, где обрабатывалась специально разработанным на Python 3 программным обеспечением. В состав выводимой информации входит отображение текущей температуры воздуха, динамический график атмосферного давления (рассчитываемый на 3 или 36 часов), значения фаз прилива или отлива, восхода и заката солнца.

**Ключевые слова:** Метеостанция, Raspberry Pi 3, GY-63 MS5611, Python 3.

## 1. Введение

При использовании любых судов очень важно краткосрочное (1-3 часа) прогнозирование погоды. В море погода меняется очень быстро и очень важно её отслеживать, учитывать изменения, так как от этого зависит безопасность кораблевождения. Для больших судов эта проблема решается за счёт дорогостоящих решений, для маломерных судов проблема стоит остро, так как в подавляющем большинстве маломерными судами используются погодные приложения. Однако, все погодные приложения обладают общим главным недостатком — они работают только при подключении к Интернету. Интернет же присутствует только в относительно не большом количестве акваторий. В прибрежном плавании (до 50 морских миль) наблюдается низкая скорость соединения с интернетом, в следствие чего, отсутствует возможность получить достоверный прогноз погоды на ближайшие сутки. Имеющиеся любительские средства не удовлетворяют потребностям метеорологической безопасности. Профессиональное оборудование дорогое и не используется на маломерных судах [1].

## 2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Предлагаемое решение заключается в создании автономной метеостанции, функционал которой позволяет автономно, в месте расположения станции собирать информацию о погоде и анализировать ее. Для этого взят микрокомпьютер Raspberry Pi 3 model B+, с предустановленной операционной системой и выносной датчик GY-63 MS5611. Создано программное обеспечение на Python 3 с использованием фреймворков sys, os, matplotlib, tkinter, numpy.

### 2.1 Принцип работы

Выносной датчик производит загрузку полученных значений непосредственно в шину данных микрокомпьютера. Далее при помощи библиотеки созданной на Python 2.7 для выбранного датчика происходит выгрузка значений из шины данных и загрузка в оперативную память микрокомпьютера. В оперативной памяти компьютера производится анализ полученных значений в соответствии с методами по расчету времени восхода/заката солнца и высчитывается фаза прилива/отлива [2].

Фаза прилива или отлива рассчитывалась исходя из правила «1/12» для текущих географических координат корабля. Восход и закат Солнца вычислялись аналогичным образом, по текущему географическому положению корабля. Вывод информации производился на 4,3-дюймовый емкостный сенсорный дисплей Waveshare. Устройство имеет влагозащищенный корпус, допускающий прямое попадание морской воды.

Полученные обработанные данные выводятся на созданный графический интерфейс и записываются в текстовые файлы, для дальнейшей обработки в случае необходимости. Формат выводимых данных позволяет использовать их для построения графиков в Microsoft Excel.

Непосредственно на графическом интерфейсе производится отображение времени, температуры, текущего значения атмосферного давления. Предусмотрено два режима анализа данных: через каждые 3 и 36 часов. В случае сверхкраткосрочного прогноза (3 часа) сбор данных о погоде производится каждые 1 минуту, в случае краткосрочного прогноза сбор данных происходит каждые 15 минут на протяжении 36 часов. Предусмотрена возможность остановки измерений до окончания выполнения программы [3,4].

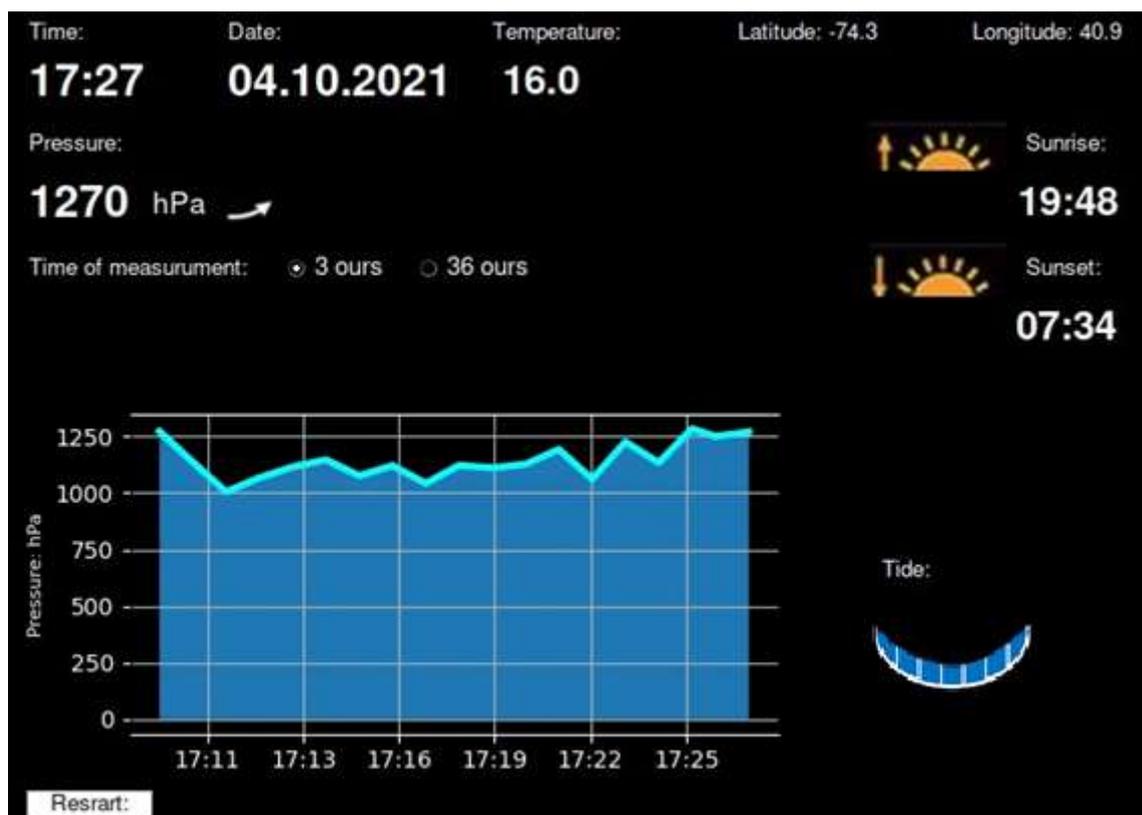


Рис.1. Макет интерфейса программы.

## 2.2 Существующие аналоги и возможное применение

National Geographic Bresser 9080500 представляет из себя портативное устройство на основе процессора, к которому подключаются внешние датчики давления, температур и влажности. Обеспечивает с приемлемой точностью прогноз давления в виде дискретных значений. Остальные значения отображаются без какой-либо аналитической информации. Соответственно отсутствует какой-либо прогноз наиболее важных параметров, таких как время прилива и отлива, время восхода захода, усиление ветра и волнения. Отсутствие защиты от морских брызг и попадания морской воды, возможности проекции дисплея на экран смартфона под управлением Android /IOS [5].

Погодные приложения обладают хорошим функционалом по количеству предоставляемой информации, но требовательны к подключению к глобальной сети Интернет. Нет анализа данных при отсутствии подключения, а соответственно и возможности своевременного обновления информации. При наличии подключения измерение данных происходит в местах расположения метеорологических станций,

то есть в портах, либо населенных пунктах, что вносит существенную погрешность и достоверность прогноза существенно снижается [6].

Профессиональные метеостанции обладают гораздо большей стоимостью и избыточным функционалом для маломерных судов.

Таблица 1.

### Сравнительная характеристика параметров метеостанций

Сравнительная характеристика возможных метеостанций				
Сравниваемые параметры	Профессиональные метеостанции	Любительские метеостанции	Погодные приложения	Метеостанция «Silver Station»
Прогнозирование текущего (до 2 часов) усиления ветра и волнения	Да	Нет	Нет	Да
Расчет заката/восхода	Нет	Нет	Нет	Да
Расчет фазы прилива	Нет	Нет	Нет	Да
Автономность (работоспособность без сети Интернет)	Да	Частично	Нет	Да
Мобильность устройства	Нет	Да	Да	Да
Учет локальных погодных условий	Да	Да	Частично	Да
Возможность морского использования	Да	Нет	Нет	Да
Готовность к использованию	Требуется установка	Сразу	Требуется установка	Сразу
Точка метеонаблюдения	Судно	Судно	Стационарный пункт	Судно
Цена	От 1200 USD	30-150 USD	Условно бесплатно	100-200 USD

### 3. Заключение.

Создан опытный образец автономной влагозащищенной метеостанции, способной делать краткосрочный прогноз, автоматически рассчитывать фазы прилива и отлива, восход и закат Солнца в зависимости от текущих географических координат, выстраивать с различными интервалами замеров динамический график изменения давления.

### Список литературы

1. Munandar A. et al. Design of real-time weather monitoring system based on mobile application using automatic weather station //2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT). — IEEE, 2017. — С. 44-47.
2. Andales A. A., Bauder T. A., Arabi M. A mobile irrigation water management system using a collaborative GIS and weather station networks //Practical applications of agricultural system models to optimize the use of limited water. — 2014. — Т. 5. — С. 53-84.

3. Popa M., Iapa C. Embedded weather station with remote wireless control //2011 19thTelecommunications Forum (TELFOR) Proceedings of Papers. — IEEE, 2011. — С. 297-300.
4. Satyanarayana K. N. V. et al. Mobile app & iot based smart weather station //International Journal of Electronics, Communication and Instrumentation Engineering Research and Development (IJEIERD). — 2017. — Т. 7. — №. С. 1-8.
5. Sarkar I. et al. Wi-Fi-based portable weather station for monitoring temperature, relative humidity, pressure, precipitation, wind speed, and direction //Information and Communication Technology for Sustainable Development. — Springer, Singapore, 2020. — С. 399-404.
6. Drobot S. et al. Using vehicles as mobile weather platforms //Data and Mobility. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. — С. 203-213.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТОЛЩИНЫ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МИШЕНЕЙ $TiO_2$ И $SiO_2$

М.А.БОГАЧЁВ<sup>1</sup>, К. Т.МАКАРОВА<sup>2</sup>

*Студент 4 курса<sup>1</sup>, студент 3 курса<sup>2</sup>*

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

**Аннотация.** В статье рассмотрено и исследовано влияние потока напускаемого рабочего газа и рабочего давления процесса магнетронного распыления мишеней  $TiO_2$  и  $SiO_2$  на неравномерности толщины тонкопленочного покрытия. Приведен расчёт толщины покрытия методом кварцевого микровзвешивания и построены его профили. Построены графики распределения толщины в зависимости от расположения резонаторов. Проведен статистический анализ результатов экспериментов, и на его основе сделаны выводы о влиянии исследуемых параметров.

**Ключевые слова:** *неравномерность, тонкопленочные покрытия, магнетронное распыление, просветляющие покрытия.*

### **Введение**

В настоящее время известно огромное количество методов формирования тонкопленочных покрытий, начиная от термического испарения и заканчивая осаждением из плазмохимической среды. Метод магнетронного распыления, благодаря ряду своих достоинств таких, как регулируемая скорость осаждения, высокой мощности, возможность получения покрытия практически из любых материалов, нашла большую популярность в сфере нанесения тонкопленочных просветляющих покрытий.

Важным критерием формирования качественных просветляющих покрытий считается неравномерность пленки. Неравномерность пленки в первую очередь определяется геометрией системы и рассчитывается согласно закону косинусов. Для достижения наибольшей точности расчетов необходимо учитывать и другие параметры процесса магнетронного распыления.

В лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении» просветляющие покрытия  $TiO_2$  и  $SiO_2$  формируются на установке ВУП-11М методом магнетронного распыления. При магнетронном распылении помимо геометрических характеристик установки на неравномерность могут оказывать влияние такие факторы, как давление процесса, с увеличением или уменьшением которого меняется концентрация частиц в вакуумной камере и соответственно траектория движения атомов распыляемого материала, и поток рабочего газа, изменение которого может изменить распределение атомов в объеме.

Целью работы является исследование влияния давления процесса магнетронного распыления и потока рабочего газа на неравномерность тонкопленочных покрытий  $TiO_2$  и  $SiO_2$ .

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Экспериментально исследовать неравномерность толщины тонкопленочного покрытия при различных значениях потока рабочего газа и рабочего давления магнетронного распыления.

2. Провести статистическую обработку полученных результатов.

3. Установить зависимость исследуемых параметров с неравномерностью толщины покрытия.

### Экспериментальная часть

В ходе работы проведены эксперименты по формированию просветляющего покрытия  $TiO_2$  и  $SiO_2$ . В качестве исследуемых параметров выбраны поток напускаемого рабочего газа, и рабочее давление процесса распыления, влияние которого было подтверждено в работах [2,3]. Распыление проводилось при рабочем давлении от  $2,5 \cdot 10^{-3}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  мбар и потоке рабочего газа аргона от 1,56 до 3,12 л/ч. Мощность распыления во всех экспериментах составляла 70 Вт, такая мощность выбрана с целью предотвращения перегрева мишени.

### Контроль толщины пленок

Толщина тонкопленочного покрытия определяется косвенным методом, через измерение частоты кварцевого резонатора до нанесения пленки и после. Измерение частоты кварцевого резонатора проводилось на приборе для измерения удельной массы тонких пленок методом пьезоэлектрического микровзвешивания.

Схема установки кварцевых резонаторов представляет собой «крест», одна ось которого объединяет группу резонаторов, лежащих в плоскости наклона магнетрона, сюда входят резонаторы 1//,2//,3//,4//,5//, а вторая — перпендикулярная первой, здесь находятся резонаторы 1,2,3//,4 и 5.

По формуле Зауэрбрея [4] разность частот пересчитывалась в удельную массу, и используя плотность материала мишени, была вычислена толщина тонкопленочного покрытия.

$$H = \frac{\Delta f \cdot \sqrt{\rho_q \cdot \mu_q}}{2 \cdot f_0^2 \cdot \rho_m} \cdot 10^9 \text{ [нм]}, \quad (1)$$

где  $\Delta f$  — изменение частоты колебания пьезоэлектрического резонатора (Гц),

$f_0$  — его собственная частота колебаний,

$\rho_q$  — плотность кварца ( $2,65 \text{ г/см}^3$ ),

$\mu$  — модуль сдвига кварца ( $2,95 \times 10^{11} \text{ дин/см}^2$ ),

$\rho_m$  — плотность напыляемого материала.

### Результаты и обсуждение

В качестве метода исследования процесса выбран полный факторный эксперимент. Предложено, что полином, описывающий процесс, имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (2)$$

где,  $b_0$  — значение функции отклика в центре плана,

$b_1, b_2$  — коэффициенты, характеризующие степени влияния соответствующих факторов на функцию отклика,

$b_{12}$  — коэффициент, характеризующие влияние взаимодействия факторов,

$X_1$  — безразмерный поток рабочего газа,

$X_2$  — безразмерное давление.

После проведения экспериментов построены графики зависимости профиля тонкопленочного покрытия от рабочего давления процесса магнетронного распыления и от потока рабочего газа в двух взаимно перпендикулярных плоскостях — плоскостях расположения кварцевых резонаторов.

Полученные результаты представлены на рисунках:

а) для резонаторов лежащих в плоскости наклона магнетрона с мишенью  $TiO_2$ , на рис. 1.

б) для резонаторов лежащих в перпендикулярной плоскости и для магнетрона с мишенью  $SiO_2$  на рисунке 2 а) и 2 б) соответственно.

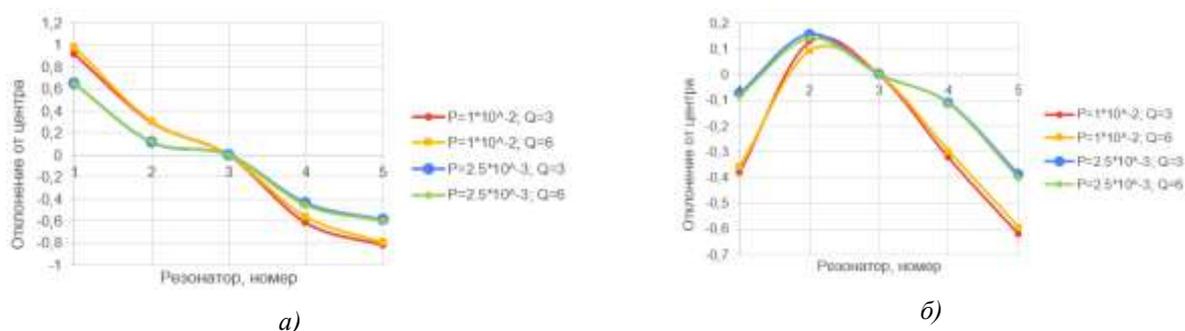


Рис. 1. Профиль тонкопленочного покрытия при распылении  $TiO_2$ : а) в плоскости наклона магнетрона (резонаторы 1//,2//,3//,4//,5//); б) в перпендикулярной плоскости (1,2,3//,4,5)

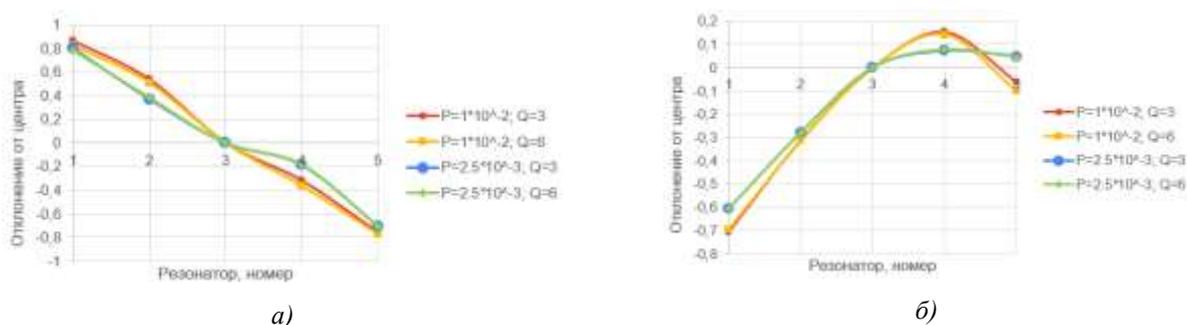


Рис. 2. Профиль тонкопленочного покрытия при распылении  $SiO_2$ : а) в плоскости наклона магнетрона (резонаторы 1//,2//,3//,4//,5//); б) в перпендикулярной плоскости (1,2,3//,4,5).

Как видно из полученных графиков основной вклад в изменение равномерности тонкопленочного покрытия вносит изменение давления процесса магнетронного распыления, в то время как поток рабочего газа визуально не влияет на отклонения толщины. Для проверки сделанных выводов была проведена статистическая обработка результатов экспериментов. Значимость влияния фактора, определяется его коэффициентом  $b_j$  с помощью критерия Стьюдента.

Полученные математические модели для каждого резонатора при распылении мишеней  $TiO_2$  и  $SiO_2$  представлены в табл. 1.

**Математические модели для каждого резонатора**

Номер резонатора	Распыление TiO <sub>2</sub>	Распыление SiO <sub>2</sub>
1//	$Y = 0,823 + 0,172X_2$	$Y = 0,802 + 0,027X_2$
2//	$Y = 0,227 + 0,016X_1 + 0,107X_2$	$Y = 0,823 + 0,065X_2$
4//	$Y = -0,524 - 0,078X_2 - 0,009X_1X_2$	$Y = -0,265 - 0,078X_2$
5//	$Y = -0,702 + 0,109X_2$	$Y = -0,734 - 0,026X_2$
1	$Y = -0,225 - 0,148X_2$	$Y = -0,654 - 0,051X_2$
2	$Y = 0,141$	$Y = -0,293 - 0,019X_2$
4	$Y = -0,217 - 0,105X_2$	$Y = 0,129 + 0,038X_2$
5	$Y = -0,217 - 0,105X_2$	$Y = -0,026 - 0,071X_2$

На основе полученных данных построены графики поверхностей зависимости отклонения толщины относительной центрального резонатора подложкодержателя от расположения резонатора в параллельной плоскости и давления процесса (рис. 3).

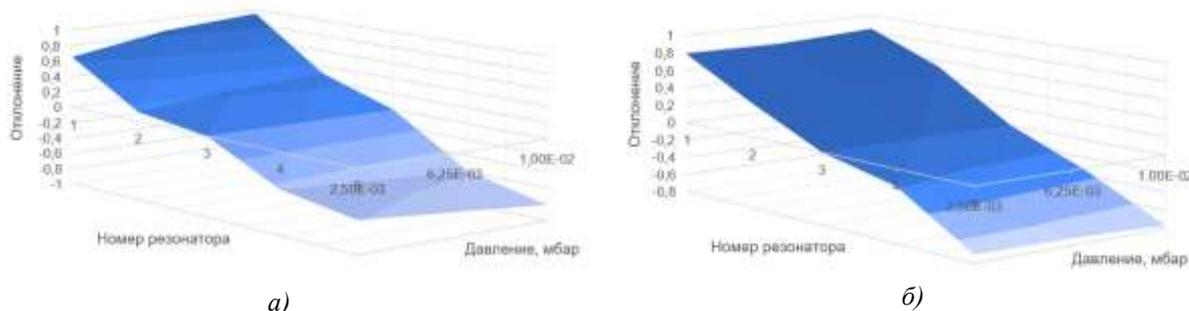


Рис. 3. Поверхность зависимости отклонения от расположения резонатора и давления:  
 а) при распылении TiO<sub>2</sub>; б) при распылении SiO<sub>2</sub>

По результатам математических моделей существенным входным фактором, влияющим на отклонение толщины тонкопленочного покрытия, является рабочее давление процесса магнетронного распыления. Статистический анализ подтвердил ранее сделанные выводы об отсутствии влияния потока рабочего газа на равномерность тонкопленочного покрытия. Хотя в некоторых полученных математических моделях и фигурирует фактор потока, его влияние на порядок меньше, чем у давления, и анализ значимости этого входного параметра показывал значения, едва превышающие критическое, что так же говорит об отсутствии влияния потока.

### Заключение

При уменьшении рабочего давления процесса равномерность толщины тонкопленочного покрытия повышается, что объясняется уменьшением длины свободного пробега при повышении давления и соответственно меньшей вероятностью ее осаждения на подложку, поэтому для формирования покрытий рекомендуется проводить процесс нанесения при более низких давлениях.

Поток рабочего газа не влияет на отклонение толщины покрытия, однако, при увеличении потока рабочего газа уменьшается коэффициент загрязнения тонких пленок [5]. Поэтому предлагается проводить процесс формирования просветляющих покрытий TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub> при наименьших давлениях и при наибольшем потоке.

### Список литературы

1. Черниговский В.В. Исследование распределения толщины покрытий, наносимых методом магнетронного распыления // Известия Спбгэту Лэти. 2018. № 4.
2. Ozimek M., Wilczyński W., Szubzda B. Magnetic thin film deposition with pulsed magnetron sputtering: deposition rate and film thickness distribution // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. IOP Publishing, 2016. Vol. 113. P. 012009.
3. Helmer J.C., Wickersham C.E. Pressure effects in planar magnetron sputter deposition // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 1986. Vol. 4, № 3. P. 408–412.
4. Sauerbrey G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung // Zeitschrift fuer Physik. Vol. 155. 1959. pp. 206-222.
5. Богачев М.А., Михайлова И.В. Влияние потока рабочего газа на критическую температуру сверхпроводящих пленок WSi // Наука настоящего и будущего. 2021.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ INGAAS/GAAS КВАНТОВЫХ ЯМА-ТОЧЕК С ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ МЕТОДОМ АП-КОНВЕРСИИ

И.А. Мельниченко<sup>1,2</sup>, А.М.Надточий<sup>2</sup>, К.А.Иванов<sup>2</sup>, И.С. Махов<sup>2</sup>, М.В.Максимов<sup>3</sup>,  
С.А. Минтаиров<sup>4</sup>, Н.А. Калюжный<sup>4</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>2</sup>, А.Е. Жуков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет  
им. Ж.И. Алфёрова РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Российская академия наук,  
Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация.** Впервые продемонстрированы временные зависимости фотолюминесценции с разрешением 0,2 пс для нового типа квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs, называемых квантовыми яма-точками (КЯТ). Для получения разрешенных по времени спектров оптических переходов легких (lh) и тяжелых дырок (hh) в КЯТ, был использован метод ап-конверсии фотолюминесценции. Было показано, что захват носителей заряда в состояния lh и hh КЯТ происходит одновременно в диапазоне времени ~ 10 пс, и, вероятно, ограничен диффузией носителей в матрице. Характерное время затухания фотолюминесценции для состояния hh (3 нс) оказалось больше, чем для lh (2 нс).

**Ключевые слова:** время-разрешенная фотолюминесценция, квантово-размерные гетероструктуры, спектроскопия

### Введение

Многие современные оптоэлектронные устройства, такие как микролазеры[1] или солнечные батареи [2], используют в своем составе активную область на основе квантовых ям (КЯ) или квантовых точек (КТ). Оба типа таких квантово-размерных гетероструктур имеют свои преимущества и недостатки, определяемые их структурными и оптическими свойствами. Например, структуры с КТ менее подвержены влиянию структурных дефектов в процессе роста, имеют сравнительно более широкий диапазон длин волн излучения и подавленную латеральную диффузию носителей. КЯ, с другой стороны, имеют гораздо более высокое оптическое усиление/поглощение, чем КТ, но из-

за большой диффузионной длины носителей заряда в латеральной плоскости их приборное применение ограничено. Поэтому для дальнейшей оптимизации свойств современных устройств необходима разработка новой конфигурации активной области.

Недавно разработанные квантовые яма-точки (КЯТ) привлекательны тем, что они сочетают в себе свойства как КТ, так и КЯ. КЯТ можно описать как сверхплотный массив КТ или КЯ с квазирегулярным изменением состава и ширины. Использование КЯТ InGaAs/GaAs в качестве активной среды в дисковых микролазерах с диаметром 20-50 мкм позволило получить генерацию в непрерывном (CW) режиме с длиной волны  $\sim 1,1$  мкм как при комнатной температуре, так и при температурах вплоть до 110 °C [3].

В данной работе мы исследовали оптические свойства КЯТ InGaAs/GaAs с помощью время-разрешенной фотолюминесценции для более глубокого понимания кинетики носителей заряда.

### **Методика эксперимента**

Гетероструктура InGaAs/GaAs с КЯТ была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии на разориентированной в направлении  $\langle 111 \rangle$  подложке GaAs (100). В качестве источника элементов III группы использовался триметилгаллий и триметилиндий, в качестве источника мышьяка использовался арсин. После осаждения буферного слоя GaAs, был выращен слой  $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$  толщиной 200 нм для предотвращения утечки носителей заряда из активной области в подложку. Активная область была сформирована из одного слоя  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  толщиной 8 монослоев и размещена в центре GaAs слоя толщиной 600 нм [4]. Далее был выращен слой  $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$  толщиной 50 нм и слой GaAs толщиной 5 нм.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) КЯТ с временным разрешением были получены при комнатной температуре с субпикосекундным временным разрешением методом ап-конверсии. В качестве источника фемтосекундного излучения был использован лазер Ti:Sapphire «Coherent Mira 900» с длительностью импульса  $\sim 130$  фс, частотой повторения 76 МГц и перестраиваемой длиной волны от 700 до 980 нм. Сигнал ФЛ регистрировался с помощью спектрометра FOG-100 (CDP Systems). Лазерный импульс с длиной волны 780 нм был разделен на два пучка с помощью делителя. Первый луч проходил через линию задержки, а второй использовался для возбуждения фотолюминесценции в образце. Результирующий сигнал ФЛ собирался оптической системой и смешивался с первым пучком на нелинейно-оптическом кристалле ВВО. Полученный преобразованный сигнал регистрировался с помощью монохроматора и фотоумножителя. Такая конфигурация установки позволила получить спектры время-разрешенной ФЛ в диапазоне длин волн 850...1200 нм с оптическим разрешением 10-15 нм и временным разрешением  $\sim 0,2$  пс.

### **Результаты и обсуждение**

На рис. 1 показана схема выращенной InGaAs/GaAs КЯТ структуры. Образование «ступенек» с различной высотой объясняется разориентацией подложки (от 2° до 15° наклона). Атомные ступеньки на вицинальной поверхности облегчают образование таких ступенек с переменным составом In в слое InGaAs.

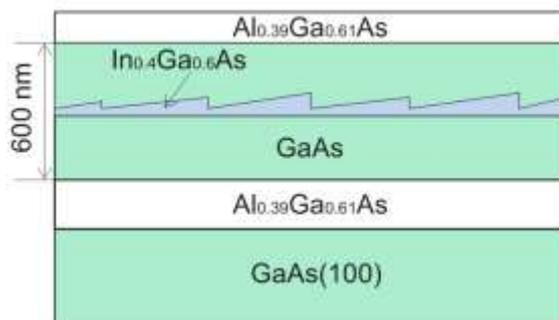


Рис. 1. Схема выращенной структуры с областью КЯТ.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) и фотопроводимости (ФП) для аналогичных структур КЯТ, представленные на рисунке 2, были получены в работе [5]. На спектре ФП наблюдаются характерное плато до  $\sim 870$  нм, что соответствует матрице GaAs, и два максимума интенсивности на 980 нм и 1040 нм. Согласно предыдущим обсуждениям [5], эти максимумы интерпретировались как излучательные переходы между электронным уровнем  $e1$  и двумя уровнями с тяжелой и легкой дырками ( $e1-hh1$  и  $e1-lh1$ ). Спектр ФЛ на рис. 2 демонстрирует смещенные согласно Стоксовскому сдвигу максимумы интенсивности для матрицы GaAs и перехода  $e1-hh1$ , и только плечо для  $e1-lh1$ . Это может быть объяснено ступенчатой зависимостью плотности состояний для КЯТ, что приводит к наложению сигнала ФЛ от  $e1-lh1$  на непрерывный сигнал  $e1-hh1$ .

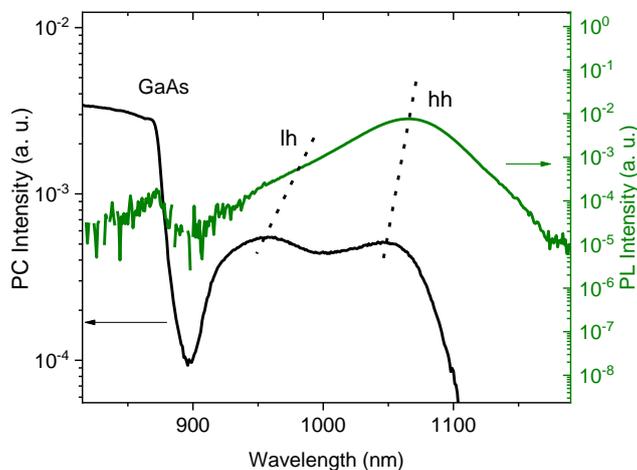


Рис. 2. Спектры ФЛ и ФП КЯТ, полученные в непрерывном режиме, комнатная температура.

Зависимости кинетики ФЛ для КЯТ, полученные при комнатной температуре и различных длинах волн (GaAs на  $\sim 875$  нм, переходы  $e1-lh1$  на  $\sim 980$  нм и  $e1-hh1$  на  $\sim 1040$  нм), показаны на рисунке 3. Средняя мощность накачки составляла 85 мВт, что соответствует плотности энергии импульса  $\sim 10$  мкДж/см<sup>2</sup>. Зависимость для GaAs демонстрирует пикосекундное время нарастания ФЛ, относительно быстрый спад в начальной части (рисунок 3 (b)) и после этого моноэкспоненциальный спад (рисунок 3 (a)) с  $\tau \sim 1,4$  нс. Для переходов КЯТ значения времен нарастания составили соответственно  $\sim 9,5$  пс и  $\sim 7$  пс для 980 нм и 1040 нм.

Можно сделать вывод, что оба состояния hh и lh заполняются носителями заряда одновременно из-за сопоставимого времени нарастания, т.е. каскадной заполнения и релаксации носителей по состояниям КЯТ не наблюдается. При этом значения времени нарастания ФЛ для КЯТ, при сравнении с данными для InGaAs КЯ в работе [6], оказываются в несколько раз больше (7-9 пс для КЯТ и 1-3 пс для КЯ). Такая разница может быть объяснена большим временем диффузии носителей заряда в большом резервуаре GaAs к слою КЯТ по сравнению с гораздо меньшими областями GaAs в случае [6]. Также следует отметить сравнительное или даже более длительное время затухания зависимости для GaAs в начальной части, чем время нарастания для переходов КЯТ (~40 пс для GaAs против ~10 пс для уровней КЯТ). Этот факт может указывать на преобладание диффузии и захвата экситонов в КЯТ, а не отдельного захвата электронов или дырок, так как в противном случае время спада GaAs должно быть меньше, чем время нарастания уровней КЯТ.

После первоначального заполнения состояний носителями заряда, переходы hh и lh обладают одинаковой интенсивностью в течение ~1 нс. Пока матрица GaAs остается заполненной носителями заряда, это позволяет подпитывать КЯТ и поддерживать рекомбинацию. Когда плотность носителей в GaAs уменьшается, мы наблюдаем начало спада сигнала ФЛ уровня lh. Уменьшение интенсивности уровня lh начинается после ~1 нс, в то время как hh состояние остается заполненным до 2,5-3 нс.

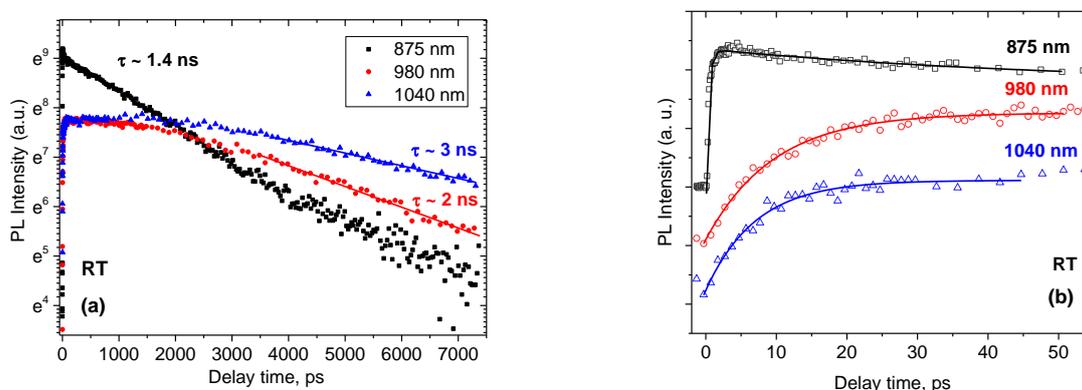


Рис. 3. Зависимости кинетики ФЛ для различных длин волн при комнатной температуре:

(a) — полный временной диапазон, (b) — начальный участок. На графике (b) зависимости сдвинуты для наглядности. Символы показывают экспериментальные данные, линии — аппроксимацию.

Относительно быстрый спад ФЛ для состояния lh ( $\tau_{\text{decay}} \sim 2$  нс) отражает относительно быстрое снижение концентрации носителей на заполненных уровнях КЯТ, как следствие рекомбинации носителей как из уровня lh, так и hh. Дальнейшая динамика ФЛ КЯТ при уже слабом уровне ФЛ lh демонстрирует более медленный спад ФЛ с уровня hh ( $\tau_{\text{decay}} \sim 3$  нс), т.к. при этом оставшиеся носители в КЯТ рекомбинируют преимущественно через hh уровень.

Время жизни для состояния hh (по уровню  $e^{-1}$ ) достигает 60 — 8 нс, что хорошо согласуется с полученными ранее результатами [4] и подтверждает, что скорость безызлучательной рекомбинации невелика из-за высокого качества образца.

### **Заключение**

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что захват носителей заряда из матрицы GaAs на уровни lh и hh КЯТ происходит одновременно и относительно медленно (~10 пс). Большое время захвата можно объяснить долгой диффузией носителей внутри большого резервуара GaAs. При этом различные носители заряда (электроны и дырки) диффундируют и захватываются в КЯТ одновременно. Характерное время спада для уровня hh (3 нс) оказалось больше, чем для lh (2 нс). Полученные времена нарастания и спада ФЛ имеют большое значение для проектирования высокоскоростных устройств на основе КЯТ.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 18-12-00287). Оптические исследования выполнены при поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2022 году.

### **Список литературы**

1. Michler P, Kiraz A, Zhang L, Becher C Hu E and Imamoglu A 2000 Appl. Phys. Lett. 77 184
2. Luque A, Martí A 1997 Phys. Rev. Lett. 78 5014
3. Moiseev E *et al.* 2018 Opt. Lett. 43 4554
4. Nadtochiy A M *et al.* 2019 Semicond. 53 1489
5. Mintairov S A *et al.* 2020 Tech. Phys. Lett. 46 3
6. Aleshkin V Ya *et al.* 2012 Semicond. 46 940

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ДЕГРАДАЦИИ ПЛЕНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ**

О.П. МИХАЙЛОВ, А.Э. ДЕГТЕРЕВ, И.А. ЛАМКИН

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

**Аннотация.** В работе была исследована защита от деградации тонких плёнок перовскита при помощи инкапсуляции полимером. Слой полимера нужен для защиты перовскита от внешних факторов: влажности, воздуха и тепла. Исследование спектральных характеристик показано, что использование полимеров в процессе создания перовскитного слоя улучшает его характеристики.

**Ключевые слова:** *перовскит, тонкая пленка, инкапсуляция полимером.*

На сегодняшний день солнечные элементы на основе перовскита демонстрируют впечатляющую эффективность и представляют собой «солнечные элементы другого типа», которые могут быть дешёвыми в производстве и могут быть полупрозрачными, легкими и гибкими. Но для выхода на текущий рынок, необходимо увеличить долговечность перовскитных элементов, так они не подходят под нынешние стандарты для разработки солнечных батарей. Вот основные стандарты для солнечных элементов:

- Первоначально правило для любого «коммерческого» солнечного элемента заключалось в том, чтобы поддерживать эффективность преобразования энергии не ниже 10% в течении 10 лет [1].

— На сегодняшний день, чтобы перовскит мог конкурировать с солнечными батареями на основе кристаллического кремния, элемент должен прослужить не менее 25 лет во внешней среде и иметь аналогичную эффективность.

К сожалению, перовскитные солнечные элементы всё ещё не соответствуют этим стандартам. Без защитных слоев перовскитный солнечный элемент на основе метиламмония-свинца-йода ( $\text{MAPbI}_3$ ) выдерживает влажность 55% в течение 480 часов [2].

Первым шагом к улучшению стабильности перовскитных солнечных элементов является понимание точных причин их нестабильности.

Факторы, вызывающие деградацию:

1. Влага.

При достаточном проникновении влаги кристалл перовскита разлагается. Установлено, что скорее всего молекулы воды образуют слабые водородные связи с органическими катионами перовскитов, и это ставит под угрозу структурную стабильность кристалла [2].

2. Ультрафиолет.

Влияние УФ-излучения на стабильность перовскитного солнечного элемента наиболее существенно в сочетании с другими факторами (например, воздействием влаги или кислорода). Однако структура перовскита деградирует и в случае, когда нет внешних факторов, но дольше [3].

3. Температура.

Высокая температура негативно влияет на структурную целостность кристаллической решётки. Также в фотоэлементе на основе перовскита существуют слои, которые при большой температуре начинают испаряться и могут разрушить кристаллическую структуру перовскита. Например, слои оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ) или оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) используемые в фотоэлементах для переноса электронов, создают дефекты в структуре перовскита при нагреве [3].



Рис. 1. Влияние высокой температуры на плёнку перовскита.

4. Внешние электрические поля.

Внешние электрические поля также негативно влияют на структуру перовскита. С увеличением внешнего электрического поля, уменьшается ширина запрещённой зоны, что уменьшает количество вырабатываемой перовскитным солнечным элементом энергии.

Для исследования процесса деградации перовскита были получены тонкие пленки кристаллической структуры перовскит на основе бромида метиламмония  $\text{MAVr}$  и бромида свинца  $\text{PbVr}_2$  [4]. Для создания тонкой плёнки кристаллической структуры перовскит необходимо создать два раствора. Для создания первого раствора были смешаны порошки метиламмония  $\text{MAVr}$  и бромида свинца  $\text{PbVr}_2$ , затем в эту же емкость добавлялся раствор

диметилформамил DMF и диметилсульфоксид DMSO. Второй раствор создавался из МАВг и изопропилового спирта. Следующим этапом формирования структур было нанесение растворов на подложку методом центрифугирования. Растворы наносились на подложку при скорости вращения 2000 об/мин. Время центрифугирования 20 секунд. Финальной стадией получения перовскитной пленки  $\text{MAPbBr}_3$  является отжиг при  $80^\circ\text{C}$  в течение 30 минут, при которой формируется кристаллическая структура.

Для исследования влияния полимеров на скорость деградации структур на основе перовскита  $\text{MAPbBr}_3$  был создан ряд образцов с различными слоями полимера:

- Полиметилметакрилат (PMMA).

Для создания инкапсулянта из PMMA был создан раствор на основе PMMA и толуола. Данный раствор наносился методом центрифугирования поверх перовскитной пленки  $\text{MAPbBr}_3$  с последующим запеканием при  $50^\circ\text{C}$  в течении 5 мин.

На рис. 2 представлены спектры фотолюминесценции образца без слоя PMMA в день создания структуры, спустя 2 дня и спустя 7 дней. На графике наблюдается максимум люминесценции на длине волны 537 нанометров в 4250 усл.ед. и далее, спустя время, пик люминесценции спадает до 3250 усл.ед. через 2 дня с момента создания образца и до 1250 усл.ед. через 7 дней с момента создания образца. На рис. 3 представлены спектры фотолюминесценции образца с нанесенным слоем PMMA в день создания структуры, спустя 2 дня и спустя 7 дней. На графике наблюдается максимум люминесценции на длине волны 540 нанометров в 14000 усл.ед. и далее, спустя время, пик люминесценции спадает до 13000 усл.ед. через 2 дня с момента создания образца и до 6500 усл.ед. через 7 дней с момента создания образца.

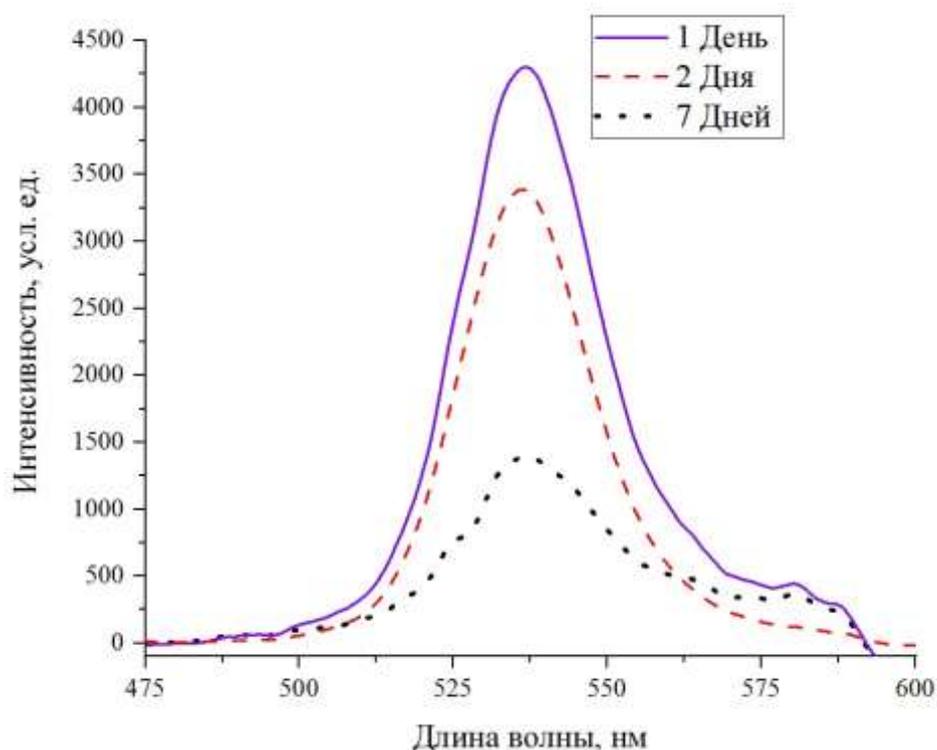


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции перовскита без полимерной защиты в день создания структур (день 1), спустя 2 дня и 7 дней.

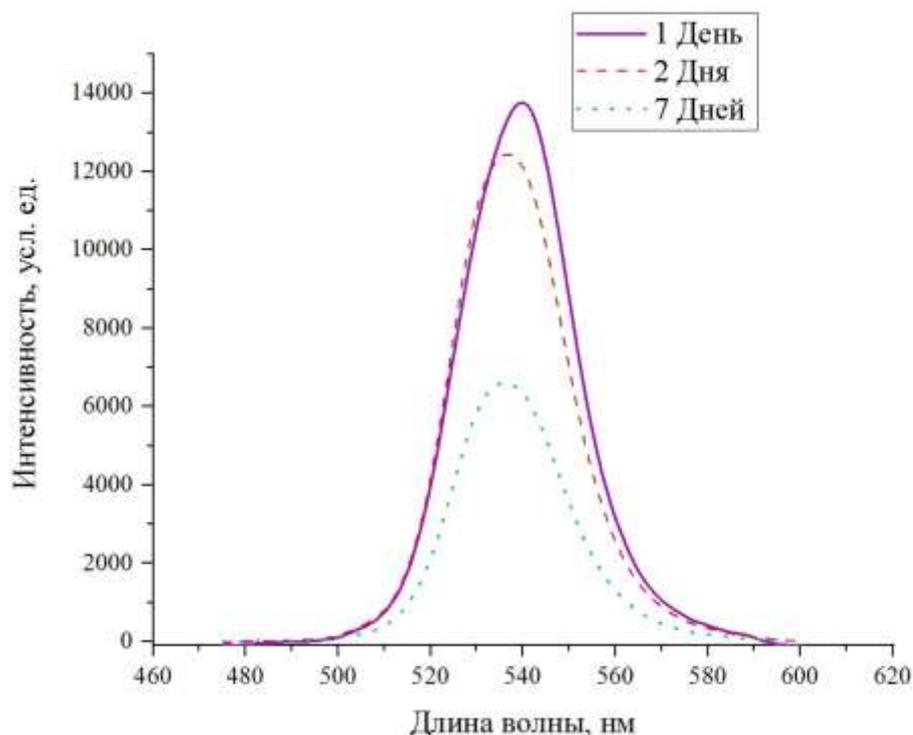


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции перовскита с защитным слоем РММА в день создания структур (день 1), спустя 2 дня и 7 дней.

По данным графикам видно, что уже после создания перовскита он очень быстро деградирует, так как в лаборатории на перовскит негативно влияет влажность и УФ. Также стоит отметить, что слой РММА дополнительно «размывает» перовскит и делает слой более равномерным.

- Поливинилпирролидон (PVP).

Для проверки влияния воды на перовскит и защитных свойств поливинилпирролидона был создан раствор на основе PVP, толуола и воды. Раствор наносился методом центрифугирования на перовскит  $\text{MAPbBr}_3$ . Однако, так как в растворе PVP присутствует вода, то она разрушает структуру перовскита, что подтверждает негативное влияние влажности на кристаллическую структуру элемента.

- Поли (9 — винилкарбазол) (PVK).

Для создания инкапсулянта из PVK были созданы несколько растворов. Растворы наносились методом центрифугирования поверх слоя перовскита. Однако, из-за малой концентрации PVK (5г PVK в 10мл толуола), раствор получался слишком жидкий и разрушал кристаллическую структуру перовскита, «размывая его». На данном этапе ведется подбор оптимального соотношения концентраций PVK и толуола для создания лучшей полимерной защиты перовскита.

Итак, подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод о том, что правильно подобранный раствор полимера может сильно увеличить долговечность структуры перовскита. Это видно на примере раствора РММА. Полимер хорошо защитил перовскит от внешнего воздействия, что видно на графиках спектральных характеристик. Однако если неправильно подобрать раствор, то можно разрушить кристаллическую структуру

перовскита. На данный момент ведутся работы по подбору оптимальных соотношений концентраций для других полимеров, и сравнению результатов с PMMA.

### Список литературы

1. Emami, S., Andrade, L., & Mendes, A. Recent Progress in Long-term Stability of Perovskite Solar Cells. *U.Porto Journal Of Engineering*, 2018, 1(2), 52-62.
2. Wang, D., Wright, M., Elumalai, N., & Uddin, A. Stability of perovskite solar cells. *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 2016, 147, 255-275.
3. Lee, S., Kim, S., Bae, S., Cho, K., Chung, T., & Mundt, L. et al. UV Degradation and Recovery of Perovskite Solar Cells. *Scientific Reports*, 2016, 6(1).
4. Degterev A.E., Romanovich M.M., Mikhailov I.I., Lamkin I.A., Tarasov S.A. Ways to Slow Down the Degradation and Enhance the Stability of Perovskite Solar Cells, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)

## СИНТЕЗ ЛИПОСОМАЛЬНОГО КВИНАКРИНА, ИЗУЧЕНИЕ ЕГО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КИНЕТИКИ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА

А.И. НИКИФОРОВ<sup>1</sup>, Д.В. КОРОЛЕВ<sup>2</sup>, Г.А. ШУЛЬМЕЙСТЕР<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России

**Аннотация.** В работе проведен синтез липосомального квинакринина методом гидратации тонких пленок при различной концентрации фосфолипидов: 5:1 и 20:1. Также были исследованы физико-химические характеристики полученных образцов (такие как размер частиц, дзета-потенциал), их кинетика высвобождения.

**Ключевые слова:** липосомы, синтез липосом, квинакрин.

В настоящее время существует высокий спрос на системы таргетной доставки лекарств, которые при этом обеспечивают высокую эффективность и низкую токсичность [1]. Для таких целей в основном используются различные наночастицы, в частности липосомы, которые на настоящее время являются единственным препаратом, одобренным FDA для клинического использования [2]. Сами по себе липосомы представляют собой как правило сферические везикулы, состоящие из нескольких фосфолипидных слоев, разделенных между собой водными фазами. Использование липосом дает множество преимуществ: обеспечивает адресность доставки, снижение токсичности инкапсулированного препарата, пролонгированность его действия. Важным также является такое свойство липосом, как амфифильность, что позволяет включать широкий спектр лекарственных препаратов в них.

В нашей работе в качестве инкапсулированного вещества выбран квинакрин (акрихин, мепакрин) — лекарственный препарат, обладающий флуоресцентными и кардиопротекторными свойствами. Представляет собой кристаллический порошок желтого цвета.

**Актуальность работы** в настоящее время достаточно высока, так как также была обнаружена активность квинакринина против коронавируса COVID-19 [14-18].

Для получения липосом с включенным квинакрином использовался метод гидратации тонких пленок.

В качестве источника фосфолипидов используется соевый лецитин, растворителем являлся хлороформ. Во время синтеза необходимо включение в состав антиоксидантов, которые предотвращают перекисное окисление липидов. В качестве такового использовался  $\alpha$ -токоферола ацетат (витамина E). Витамин E является жирорастворимым антиоксидантом, предотвращающим образование и распад гидропероксидов жирных кислот и дезактивацию свободных радикалов. Для придания жёсткости оболочке использовался холестерин. Его наличие позволяет сохранить структуру липосом и предотвратить вытекание жидкости.

Для синтеза многослойных липосом сначала получали липидную плёнку в круглодонной колбе объёмом 2000 мл. Для этого навеску соевого лецитина (массой 75 или 300 мг, в зависимости от желаемой концентрации фосфолипидов) и холестерина в количестве 15 мг растворяли в 15 мл хлороформа. Далее добавляли 10 мкл  $\alpha$ -токоферола ацетата для предотвращения окисления. Растворитель упаривали на ротационном испарителе (RE-5000 Rotary Evaporator, Китай) под вакуумом (N 810 LABORPORT, UK) без нагревания до образования тонкой плёнки. Полученную липидную плёнку досушивали при температуре водяной бани  $35\pm 5^\circ\text{C}$  до состояния прозрачности.

Далее проводилась гидратация водно-спиртовым раствором квинакрина для включения его внутрь липосом.

Для уменьшения размера липосом использовалась ультразвуковая обработка. Для этого полученную суспензию «больших» липосом переносили в коническую полипропиленовую пробирку и обрабатывали на ультразвуковом диспергаторе УЗГ13-0,1/22 (НИИ ТВЧ, Россия) с частотой 20 кГц в течение 10-15 минут.

Для получения биологически совместимого образца QLPS было необходимо избавиться от этилового спирта в дисперсной среде и заменить его на физиологический раствор. Для этого проводился диализ в диализном мешке с размером пор 12-14 кДа в стеклянном химическом стакане объёмом 2000 мл. Образец двоекратно ставился против воды при перемешивании со скоростью  $200\text{ мин}^{-1}$  на магнитной мешалке в течении 1 часа. Затем диализ проводился против физиологического раствора при тех же параметрах.

Полученные результаты распределения липосом по размерам, их дзета-потенциал, а также микрофотографии «больших» липосом представлены на рис. 2.

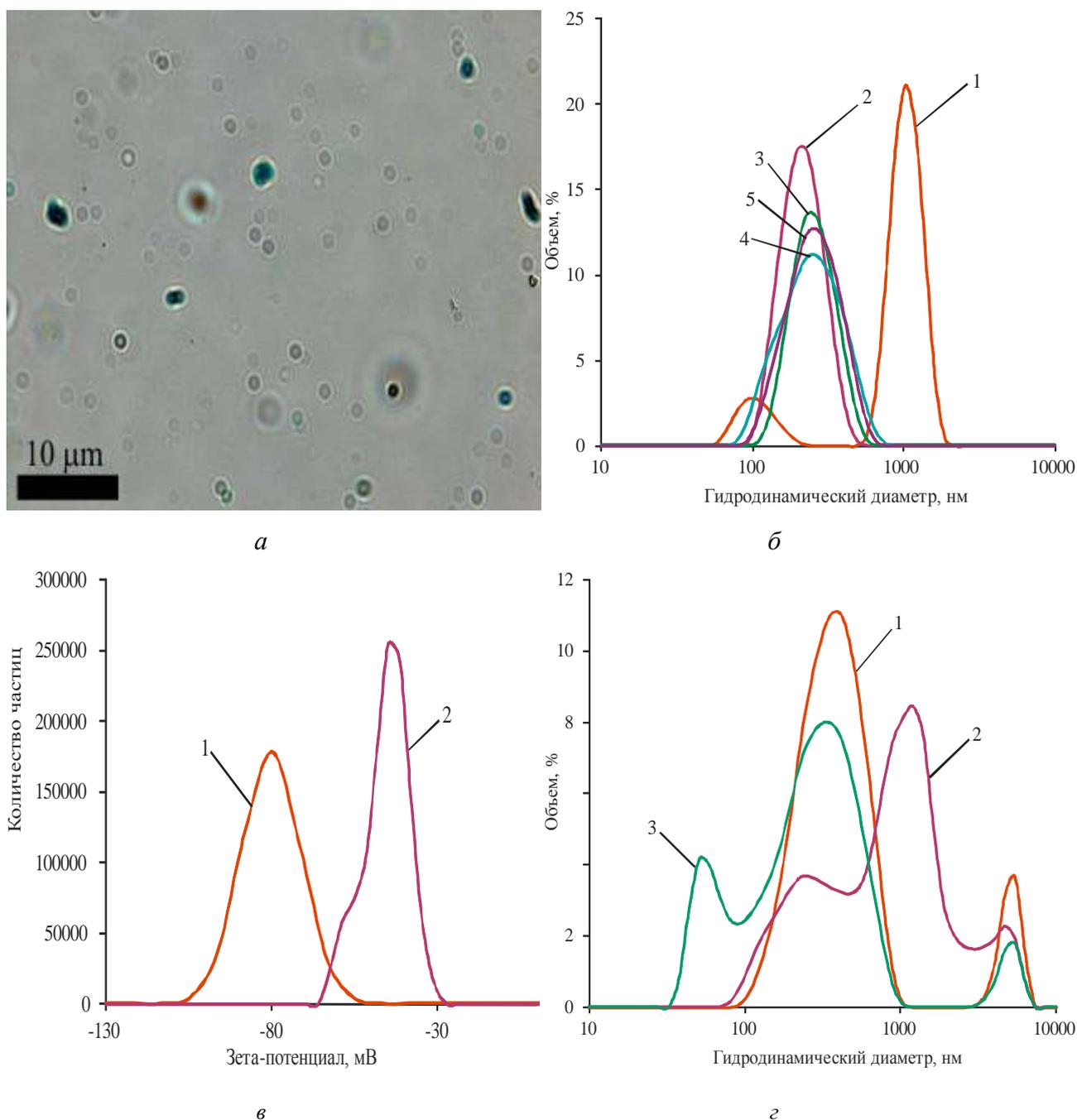


Рис. 1. Физико-химические свойства QLPS: а — микроскопическое изображение «больших» ЛПС; б — объемное распределение QLPS по размерам с концентрацией ФЛП 20 мг/мл, 1 — до УЗГ, 2 — после УЗГ, 3 — после диализа, 4 — спустя неделю, 5 — спустя 2 недели; в — зета потенциал QLPS с концентрацией ФЛП 20 мг/мл, 1 — до УЗГ, 2 — после УЗГ; г — объемное распределение QLPS по размерам с концентрацией ФЛП 5 мг/мл, 1 — до УЗГ с ХС, 2 — до УЗГ без ХС; 3 — после УЗГ без ХС

Для упрощения восприятия все данные для липосом с концентрацией 5 мг/мл и 20 мг/мл сведены в таблицы 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Характеристики QLPS с концентрацией ФЛП 5 мг/мл

№	Наименование	Гидродинамический диаметр, нм	Зета потенциал, мВ	PDI
1	QLPS до УЗГ	300.0	-25.9	0.27
2	QLPS без ХС до УЗГ	1209.0	—	0.45
4	QLPS без ХС после УЗГ	51.0/361.3	—	0.27

Таблица 2

Характеристики QLPS с концентрацией ФЛП 20 мг/мл

№	Наименование	Гидродинамический диаметр, нм	Зета потенциал, мВ	PDI
1	QLPS до УЗГ	93.0/1039.0	-80.1	0.77
2	QLPS после УЗГ	242.3	-45.5	0.34
4	QLPS после диализа	279.8	—	0.34
5	QLPS спустя 1 неделю	233.4	—	0.24
6	QLPS спустя 2 недели	270.3	—	0.34

Кривые высвобождения квинакрина из липосом представлены на рис. 2.

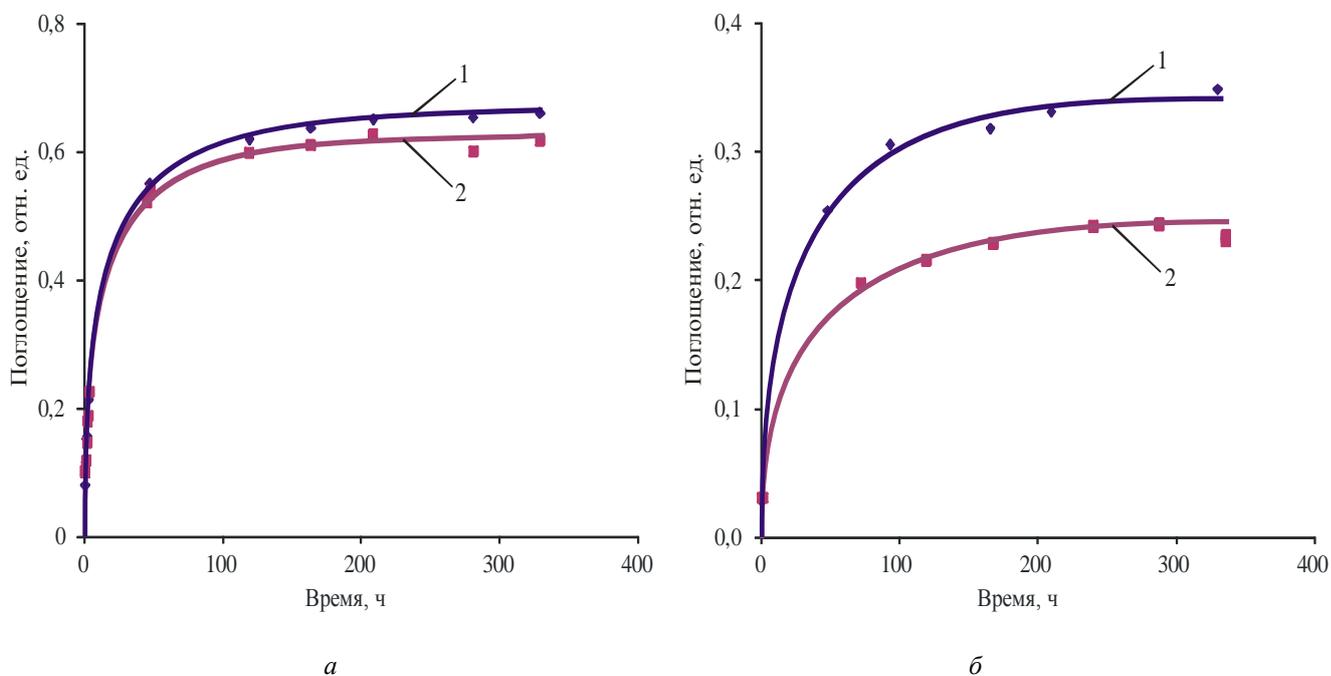


Рис. 2. Кривые высвобождения квинакрина из QLPS:

а — содержание ФЛП 5 мг/мл; б — содержание ФЛП 20 мг/мл; 1 — без ХС; 2 — с добавлением ХС.

Сравнивая полученные результаты синтеза липосом с инкапсулированным квинакрином с концентрацией ФЛП 5 мг/мл и 20 мг/мл, нельзя однозначно сказать, какой из методов более предпочтительный. При более высокой концентрации фосфолипидов одновременно с количеством липидных слоев растет и сам гидродинамический размер ЛПС, а разброс в значениях размеров становится заметно больше, что видно по показателю индекса полидисперсности. Однако вместе с тем частицы получаются более прочными и вероятность их разрушения под воздействием окружающей среды или организма гораздо меньше. Липосомы с меньшей концентрацией фосфолипидов, напротив, имеют более гомогенное распределение по размерам, но заметно меньшую прочность, однако наличие холестерина значительно улучшает данный параметр. Для применения *in vivo* могут быть использованы оба вида липосом.

По результатам исследования профиля высвобождения действующего вещества — квинакрин можно сделать вывод о том, что холестерин действительно укрепляет оболочку и при включении его в состав липосом они менее активно теряют инкорпорированное вещество. Большее количество фосфолипидов также закономерно укрепляет оболочку, еще более замедляя процесс высвобождения.

#### Список литературы

1. Kumar, A.; Chen, F.; Mozhi, A.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Xue, X.; Hao, Y.; Zhang, X.; Wang, P.C.; Liang, X.J. Innovative pharmaceutical development based on unique properties of nanoscale delivery formulation // *Nanoscale*. 2013. V. 5. P. 8307–8325.
2. Almeida, B., Nag, O.K., Rogers, K.E., Delehanty, J.B. Recent Progress in Bioconjugation Strategies for Liposome-Mediated Drug Delivery // *Molecules*. 2020;25(23):5672.
3. Pineda B., Pérez de la Cruz V., Hernández Pando R., Sotelo J.. Quinacrine as a potential treatment for COVID-19 virus infection. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2021. V. 25. P. 556-566.
4. Pineda B. Quinacrine, an Old Drug with Potentially useful in the Treatment for COVID-19. *Arch Med Res*. 2021. V. 52. P. 858-859
5. Eberle R.J., Olivier D.S., Amaral M.S., Gering I., Willbold D., Arni R.K., Coronado M.A. The Repurposed Drugs Suramin and Quinacrine Cooperatively Inhibit SARS-CoV-2 3CLpro In Vitro. *Viruses*. 2021. V. 13. P. 873.
6. Salas Rojas M., Silva Garcia R., Bini E., Pérez de la Cruz V., León Contreras J.C., Hernández Pando R., Bastida Gonzalez F., Davila-Gonzalez E., Orozco Morales M., Gamboa Domínguez A., Sotelo J., Pineda B. Quinacrine, an Antimalarial Drug with Strong Activity Inhibiting SARS-CoV-2 Viral Replication In Vitro. *Viruses*. 2021. V. 13. P. 121.
7. Puhl A.C., Fritch E.J., Lane T.R., Tse L.V., Yount B.L., Sacramento C.Q., Tavella T.A., Costa F.T.M., Weston S., Logue J., Frieman M., Premkumar L., Pearce K.H., Hurst B.L., Andrade C.H., Levi J.A., Johnson N.J., Kisthardt S.C., Scholle F., Souza T.M.L., Moorman N.J., Baric R.S., Madrid P., Ekins S. Repurposing the Ebola and Marburg Virus Inhibitors Tilorone, Quinacrine and Pyronaridine: In vitro Activity Against SARS-CoV-2 and Potential Mechanisms. *ACS Omega*. 2021. V. 6. P. 7454-7468.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОФОБНО-ГИДРОФИЛЬНЫХ СВОЙСТВ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ АСМ

И.А. НОВИКОВ

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

**Аннотация.** В данной работе исследуется возможность анализа гидрофобно-гидрофильных свойств антиобледенительных органосиликатных покрытий различными методами атомно-

силовой микроскопии. Образцы покрытий были предоставлены Институтом химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, лаборатория неорганического синтеза. Используются различные режимы сканирования: контактный, полуконтактный, гибридный. Представлены карты распределения различных механических параметров образцов.

**Ключевые слова:** *атомно-силовая микроскопия, антиобледенительные покрытия, органосиликатные композиции.*

### **Введение**

Антиобледенительные покрытия играют важную роль не только в повседневной жизни, защищая различные поверхности, будь то архитектурные сооружения, различные приборы или наружные возведения от влаги и льда, но и в стратегически важных отраслях [1]. Так, например, без них невозможно использование техники в условиях Крайнего Севера, а также освоение северных регионов, которым присущи отрицательные температуры. Поэтому важно, чтобы такие покрытия проявляли хорошую адгезию к материалу, на который их наносят, а также снижали силу сцепления льда с поверхностью в течение длительного времени [2].

Методы атомно-силовой микроскопии, помимо детального изучения морфологии поверхности, позволяют качественно изучать различные свойства и характеристики поверхности с высоким латеральным разрешением. Более того, комбинируя различные методики, становится возможным определять фазовый состав многокомпонентных наноструктурированных материалов [3]. Оценить адгезионные свойства поверхности возможно с помощью контактных методик атомно-силового микроскопа.

Для классических атомно-силовых микроскопов при подводе зонда к поверхности твердого тела происходит изменение величины изгиба кантилевера в зависимости от расстояния между зондом и образцом при достижении зондом поверхности. При отводе зонда от поверхности образца изгиб кантилевера так же зависит от расстояния между зондом и образцом, при этом линии подвода и отвода кантилевера могут не накладываться и значительно отличаться, образуя гистерезис, связанный с работой сил адгезии [4, 5]. Наиболее наглядно оценить особенности адгезионных свойств материала возможно в том случае, когда они представлены в виде карт распределения по поверхности изучаемого образца. Данная функция реализована в атомно-силовом микроскопе NT-MDT Integra с контроллером Hybrid Mode HD 3.0, с помощью которого и проводятся исследования в данной работе. Таким образом, целью данной работы является изучение гидрофобно-гидрофильных свойств антиобледенительных покрытий на основе органосиликатных композиций методами АСМ.

Принцип работы гибридного режима состоит в том, что изображение формируется на основе множества силовых кривых «сила-расстояние», снятых в каждой точке области сканирования. Анализируя полученные зависимости, проводится формирование изображения распределения морфологии, электрических, тепловых, механических и других свойств. При этом минимизируется воздействие латеральных сил, которое могло бы повлиять на качество получаемого изображения [6, 7]. Таким образом, используя данный режим сканирования, возможно получать множество исчерпывающей информации за один цикл измерений.

### **Эксперимент**

Исследуемые образцы покрытий на основе кремнийорганических соединений были предоставлены лабораторией неорганического синтеза (Красильникова Л.Н.) Института

химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН. Измерения проводились при помощи сканирующего зондового микроскопа NT-MDT Integra с использованием зондов марки CSG-10. Для наиболее объективной оценки адгезионных свойств изучаемых образцов используются различные режимы сканирования: контактный, полуконтактный, а также гибридный режим. Первые два режима сканирования осуществлялись при прямом и обратном проходе для получения наиболее достоверных результатов. В контактном режиме проводилось картирование рельефа поверхности, регистрация нормального отклонения кантилевера (сигнал DFL), а также латеральное отклонение (сигнал LF), позволяющее различать области разного состава, отличающиеся коэффициентами трения [4]. В полуконтактном режиме, помимо рельефа, фиксировались изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера при взаимодействии с поверхностью образца. При использовании гибридного режима регистрировались рельеф поверхности, силы адгезии, работа сил адгезии, модуль Юнга, а также жесткость образца и его упругие деформации под воздействием зонда. Были получены изображения различного масштаба. В зависимости от размеров области и параметров сканирования для получения наиболее качественных и достоверных изображений подбиралась скорость сканирования, которая не превышала 10 мкм/с.

### Результаты и обсуждение

По полученным результатам можно сказать о неоднородной структуре, которая не проявляется на классических картах распределения рельефа (рис. 1), однако отлично наблюдается при рассмотрении различных параметров, таких как модуль Юнга (рис. 2), силы адгезии системы «зонд-образец» (рис. 3), упругие деформации образцов под воздействием кантилевера (рис. 4) и других, используемых в гибридном режиме. Далее представлены изображения одного из образцов, полученные в гибридном режиме атомно-силового микроскопа NT-MDT Integra.

По представленным ниже изображениям можно сказать о том, что структура имеет области с различным коэффициентом жесткости, что может объясняться сложной морфологией образца. Предполагается, что данный эффект наблюдается из-за чередования малоразмерных областей, имеющих различный характер взаимодействия с водой. Дополнительно были проведены анализы кривых силовой спектроскопии, по которым так же можно сказать о неоднородном распределении по поверхности образца участков с различными адгезионными свойствами.

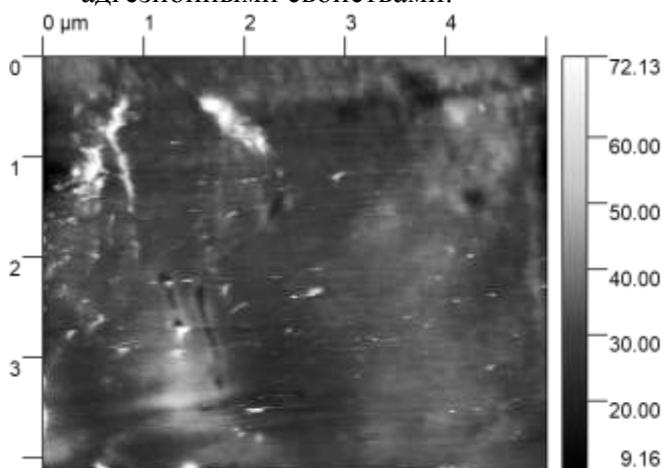


Рис. 1. Изображение рельефа поверхности.

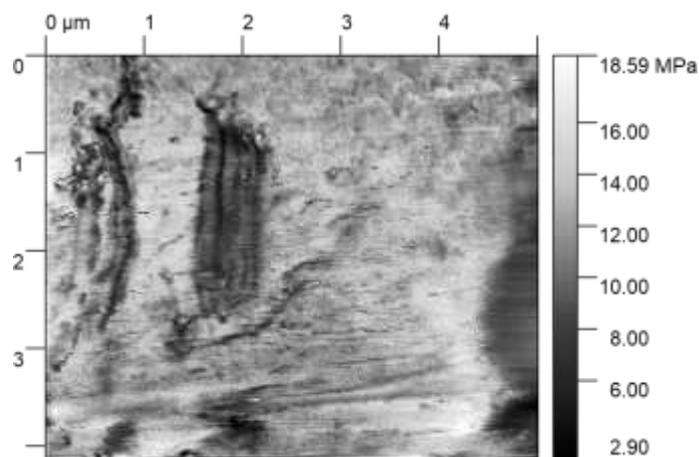


Рис. 2. Карта распределения модуля Юнга.

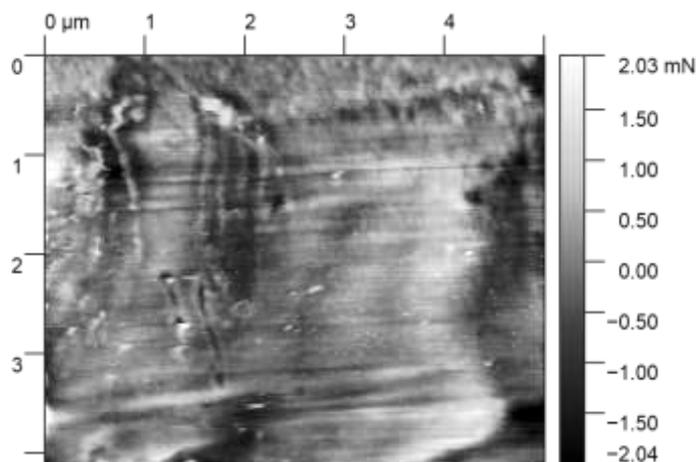


Рис. 3. Карта распределения сил адгезии.

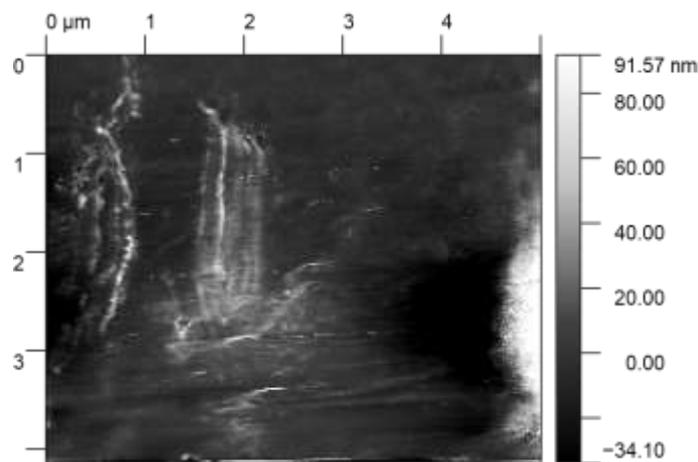


Рис. 4. Карта распределения деформации образца.

### Заключение

С помощью различных методов сканирующей зондовой микроскопии было проведено исследование антиобледенительных покрытий на основе кремнийорганических соединений. По полученным изображениям были выявлены области с различными адгезионными свойствами. Можно предположить, что в том случае, когда одновременно полученные изображения рельефа и карты распределения сил адгезии частично не коррелируют между собой, возможно наблюдать гидрофобные и гидрофильные участки, которые будут по-разному взаимодействовать с влагой. Таким образом, была предложена методика исследования гидрофобно-гидрофильных свойств органосиликатных покрытий с помощью атомно-силового микроскопа.

### Список литературы

1. Пат. 2681027 Российская Федерация, МПК С 09 К 3/18, С 09 D 183/04, С 08 К 3/34. Композиция для атмосферостойкого антиобледенительного покрытия с повышенной гидрофобностью / Красильникова Л.Н., Шилова О.А., Кручинина И.Ю., Шевченко В.Я.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН) — № 2016141009, заявл. 18.10.16; опубл. 18.04.2018, Бюл. № 7. — 7 с.
2. Чуппина С.В. Органосиликатные антиобледенительные градиентные покрытия // Физика и химия стекла. — 2007. — Т. 33. — № 5. — С. 691-702.
3. Chernov E.A., Samsonov V.A., Spivak Y.M., Grebenschikova E.A. The effect of electrochemical oxidation time on the surface morphology of oxidized indium phosphide // Journal of Physics: Conference Series. «International Conference PhysicA.SPb 2020». — 2020. — С. 012111.
4. 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. — Т. 144. С. 44-45.
5. Мошников В. А., Спивак Ю. М. Атомно-силовая микроскопия для нанотехнологии и диагностики: Учеб. пособие // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2009. — Т. 80. — С. 12.
6. Спивак Ю.М., Мошников В.А., Красильникова Л.Н., Иванова А.Г., Шилова О.А. Новые возможности методов атомно-силовой микроскопии для анализа физико-механических свойств и однородности гетерофазных функциональных покрытий. // Химия для биологии, медицины, экологии и сельского хозяйства. II Межд. симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения академика М.Г. Воронкова: Сб. тезисов докладов. ИХС РАН им. И.В. Гребенщикова РАН. — 2021. Т. 1. — С. 24-26.
7. Hybrid Mode™. Прыжковая атомно-силовая микроскопия. <https://www.ntmtd-si.ru/products/afm-features/hybrid-mode> (дата обращения 10.04.2022).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ФТАЛОЦИАНИНА МЕДИ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

М.Д. ПАВЛОВА, И.А. ЛАМКИН, Е.М. ЮРЧЕНКО

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

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования влияния температуры подогрева подложки и массы испаряемого вещества на спектральные характеристики органических фоточувствительных структур типа FTO/CuPc/PTCDA/Al. В работе продемонстрировано, что наилучшее качество слоев на основе CuPc достигается при температуре подогрева подложки в 60°C, а для PTCDA — при 55°C. Также в работе приведено исследование влияния массы испаряемого вещества на величину фоточувствительности исследуемых структур, на основании этих данных был сделан вывод об оптимальной толщине активных слоев.

**Ключевые слова:** *фталочанин меди, CuPc, 3,4,9,10-перелентетроксидкорбаксидиангидрид, PTCDA, органические фоточувствительные структуры.*

Перспективными направлениями применения органических полупроводниковых соединений, в частности фталочанинов металлов, являются их использование в светоизлучающих устройствах, солнечных элементах и других областях микро- и нанoeлектроники.

В солнечной энергетике органические материалы привлекают внимание благодаря высокой прочности, пониженной стоимости, экологичности и возможности, при помощи химических процессов, управлять параметрами материала, таким как ширина запрещенной зоны, коэффициент поглощения и т.д.. Все это дает возможность создавать фоточувствительные структуры в виде ультратонких (толщиной несколько сотен нанометров) пленок, наносимых в виде растворов на гибкие подложки, что позволяет изготавливать полимерные солнечные элементы, используя дешевые методы массового производства, например, штамповка или струйная печать.

Для того чтобы создать эффективный образец, необходимо подобрать материалы таким образом, чтобы обеспечивалась наилучшая конфигурация энергетических уровней в структуре, обеспечивалось высокое поглощение, эффективная диссоциация экситонов на гетерогранице и наименьшая рекомбинация носителей зарядов при их движении к электродам. Для этого необходимо подобрать оптимальные толщины и состав активных слоев.

В ходе работы было исследовано влияние температуры подогрева подложки в процессе осаждения материала на качество слоев CuPc и PTCDA. Органические слои наносились методом вакуумного термического испарения, температура подогрева подложки изменялась от 50°C до 75°C с шагом 5°C, остальные параметры процесса, такие как масса испаряемого вещества, тип и размер лодочки, ее расстояние до подложки оставались неизменными. Для оценки качества структуры слоев использовались оптические методы, основным из которых являлось исследование спектров коэффициента поглощения, которые были измерены при помощи спектрометра быстрого сканирования. В качестве источника излучения использовалась лампа накаливания. Качество пленки оценивалось путем сравнения спектральных зависимостей спектров поглощения в 5 точках для каждого образца,

а затем сравнивались спектральные характеристики образцов, осажденных при разной температуре.

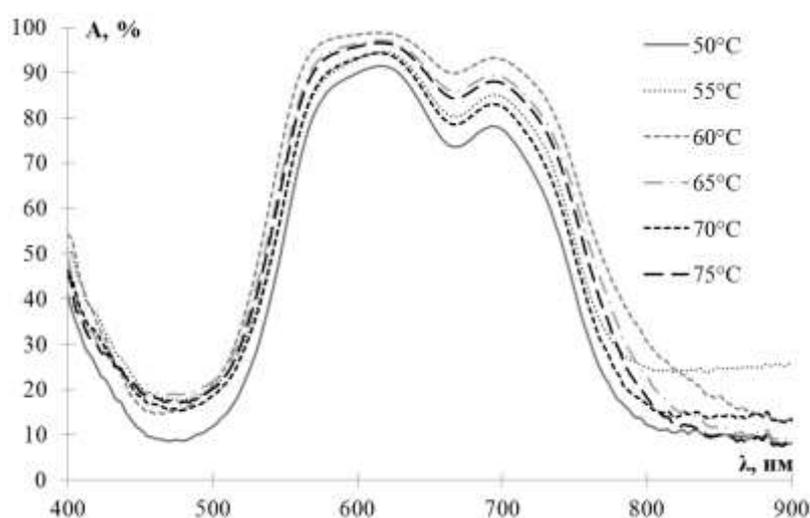


Рис. 1. Спектры поглощения пленок CuPc, выращенные при разной температуре подогрева подложки.

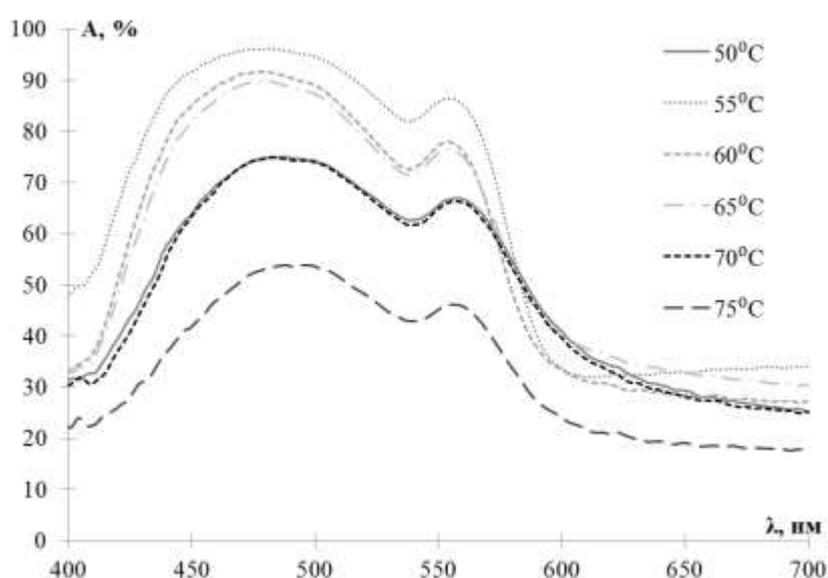


Рис. 2. Спектры поглощения пленок PTCDA, выращенные при разной температуре подогрева подложки.

Обобщая экспериментальные данные, было установлено, что для CuPc оптимальная температура подогрева подложки является что 60°C, а для PTCDA — 55°C, поскольку при данных темперах наблюдается максимальное поглощение и наилучшая однородность пленок. Исследования показали, что температур меньше оптимальных было недостаточно для обеспечения прочного сцепления осаждаемого материала к подложке и формирования однородного слоя, вследствие недостаточной энергии молекул. Ухудшение параметров при температурах выше оптимальных, может быть объяснено процессами реиспарения вещества. Также из зависимостей, приведенных на рис. 1 и рис. 2, можно сделать вывод, что на качество слоев PTCDA температура влияет сильнее, что обусловлено химическим строением молекулы.

На эффективность солнечных элементов так же влияет такой параметр, как толщина активных слоев. Для его оценки была изготовлена серия образцов на основе структуры типа FTO/CuPc/PTCDA/Al с различной толщиной слоев CuPc/PTCDA, которая варьировалась путем изменения массы испаряемого вещества, представленной в табл. 1. Температура подогрева подложки выбиралась на основе исследований, описанных выше, остальные технологические параметры не изменялись.

Таблица 1

**Параметры создания образцов типа FTO/CuPc/PTCDA/Al**

№ образца	Масса испаряемого вещества, мг	
	CuPc	PTCDA
1 образец	20	20
2 образец	10	10
3 образец	30	30
4 образец	25	25

Для созданных структур было проведено исследование спектров фоточувствительности. Измерения проводились при помощи дифракционного решеточного монохроматора и пикоамперметра.

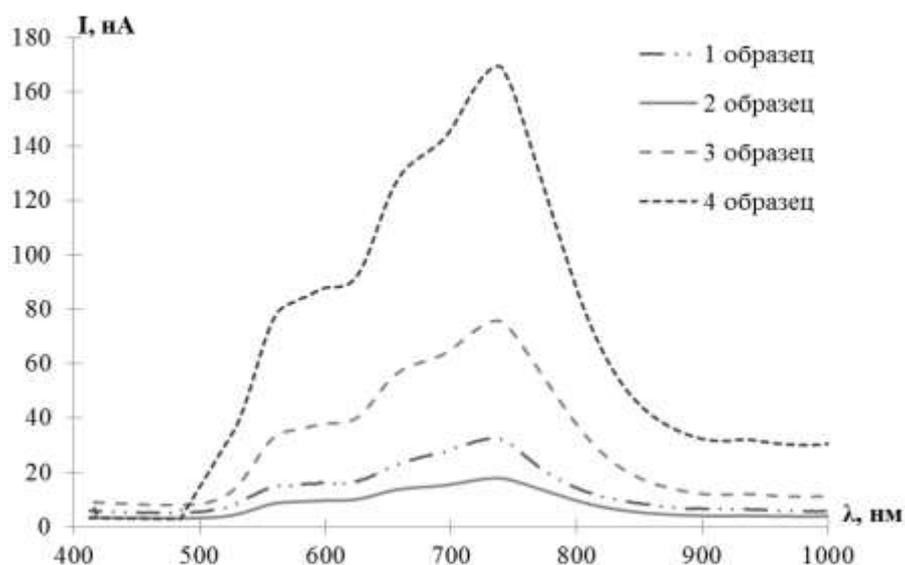


Рис. 3. Спектры фоточувствительности образцов типа FTO/CuPc/PTCDA/Al

На основе полученных зависимостей можно сделать вывод, что масса испаряемого вещества не влияет на ход кривых, но при этом значительно изменяются значения фототока. Было выявлено, что наилучшими характеристиками обладает образец 4, у которого максимальное значение фототока достигает 170 нА, ширина пика на полувысоте составляет 250 нм. Для 3 образца наблюдается уменьшение фототока, это может говорить о затруднении диффузии экситона к гетерогранице и его диссоциации.

Таким образом, в работе представлены результаты исследования влияния температуры подогрева подложки и массы испаряемого на спектральные характеристики органических фоточувствительных структур типа FTO/CuPc/PTCDA/Al. Было установлено, что для CuPc оптимальной температурой является 60 °С, а для PTCDA – 55 °С. Также в работе бы-

ли исследованы спектры фоточувствительности структур типа FTO/CuPc/PTCDA/Al и было установлено, что наилучшие параметры образца достигаются, когда масса испаряемого вещества составляет 25 мг, так как при данных параметрах наблюдается максимальный фототок.

## **ЕМКОСТНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК ОБНАРУЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА**

К.В. ПАНКРАШКИНА

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

**Аннотация.** В данной работе представлена разработка бесконтактного датчика приближения человека, срабатывание которого основано на изменении электрического поля при приближении к нему руки человека. Описаны методы и результаты подбора основных компонентов, на основе которых работает данное устройство.

**Ключевые слова:** бесконтактный датчик, емкостный датчик, датчик приближения человека.

В настоящее время бесконтактные технологии развиваются достаточно быстро, начиная от автоматического открывания дверей при входе в какое-либо помещение, заканчивая технологией бесконтактной оплаты с помощью банковских карт. Данное направление является перспективным, так как в еще недавно бушующей пандемии COVID-19 каждый из нас старался обезопасить свое здоровье и не прикасаться руками к поверхностям, особенно в местах общего пользования. Разрабатываемое устройство особенно актуально для применения в чистых зонах, например в медицинских учреждениях или на промышленных предприятиях. В данных условиях особенно важно оставлять руки чистыми до каких-либо манипуляций, проходя предварительную подготовку. Такой датчик может стать устройством для бесконтактного открытия дверей и других предметов.

### **Преимущества емкостных датчиков приближения человека.**

1. Возможность обнаружения объектов через «непрозрачные препятствия», например, через жидкости, стекло или пластик;
2. Стабильность порога в широком диапазоне температур или напряжений питания;
3. Значительное снижение ложных срабатываний за счет того, что выходной сигнал датчика сравнивается с эталонным сигналом;
4. Простая, надежная конструкция;
5. Бесконтактный принцип работы;
6. Относительно низкая цена.

### **Недостатки емкостного датчика приближения человека**

1. Возможные требования к экранированию.
2. Влияние окружающей среды на функционирование датчиков;
3. Влияние материала и габаритов объекта регистрации на параметры приборов. [1]

В основу работы таких датчиков лежит изменение диэлектрической проницаемости, а следовательно, и емкости при приближении человека к устройству. В разрабатываемом

датчике в качестве компонента для отслеживания изменения емкости был выбран плоский электрод, помимо него в данном датчике присутствует каскад из операционных усилителей, как инвертирующих, так и неинвертирующих, и эталонный конденсатор. Разработка устройства была начата с отладки операционных усилителей.

Напряжение питания в данном устройстве 12 В. Каскад операционных усилителей состоит из одного не инвертирующего усилителя и двух инвертирующих усилителей. Номиналы резисторов были подобраны экспериментальным путем. Подбор номиналов для достижения оптимального усиления был начат с каскада из двух операционных усилителей инвертирующего и не инвертирующего выходное напряжение.

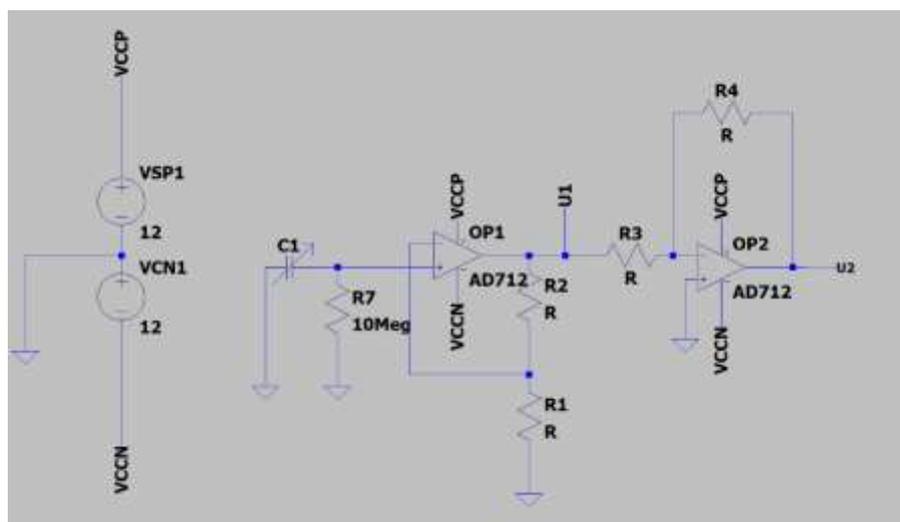


Рис. 1. Упрощенная схема подключения каскада из двух операционных усилителей

В ходе подключения резисторов различных номиналов был найден оптимальный вариант, имеющий наибольшее усиление на выходе второго операционного усилителя.

Таблица 1

**Предварительные значения номиналов резисторов для каскада из двух операционных усилителей**

R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	U1, мВ	U2, мВ
1	4,7	0,47	15	1,3	145,2

Так как напряжение на выходе операционного усилителя напряжения U2 является инвертированным, то необходимо поставить еще один инвертирующий усилитель для того, чтобы проинвестировать сигнал и одновременно увеличить его. Для каскада из трех операционных усилителей необходимо также подобрать номиналы резисторов, для того чтобы достичь максимального усиления напряжения.

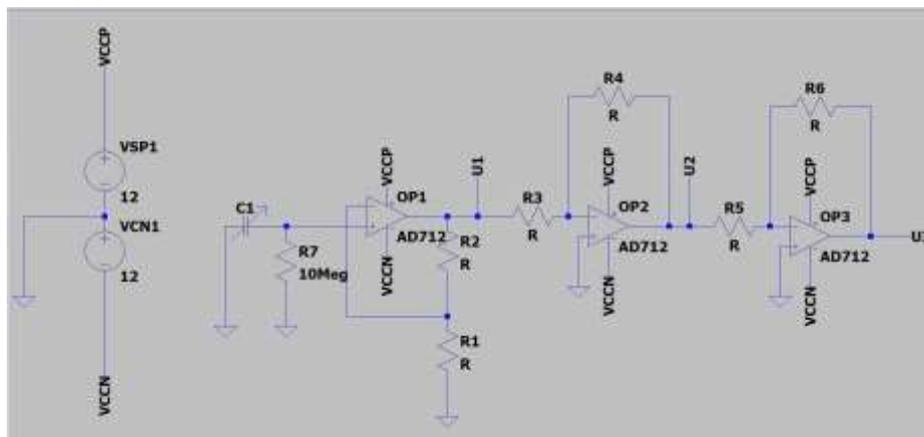


Рис. 2. Упрощенная схема подключения каскада из трех операционных усилителей.

В данной схеме номиналы резисторов также определялись подбором. Было найдено максимальное значение напряжения на выходе операционного усилителя напряжения U3.

Таблица 2

**Значения номиналов резисторов для каскада из трех операционных усилителей**

R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	R6, кОм	U1, мВ	U2, мВ	U3, В
47	4,7	2,2	15	4,7	470	0,5	40,5	4,31

Практически все номиналы резисторов были увеличены для не инвертирующего и первого инвертирующего усилителей по сравнению с предварительным подбором сопротивлений для каскада, состоящего из данных операционных усилителей. Это связано с тем, что подключен еще один операционный усилитель, из-за этого на выходах напряжения U1 и U2 достаточно сильно снизилось выходное напряжение. Подобранные резисторы позволяют получить максимальное усиление на выходе напряжения U3.

В разрабатываемом датчике в качестве компонента для отслеживания изменения емкости был выбран плоский электрод, длина которого определялась экспериментальным путем. Данный электрод подключается к прямому входу первого операционного усилителя. Были исследованы 8 электродных пластин разной длины и рассчитано среднее значение напряжения для каждого из электродов из 10 значений при различном положении руки человека относительно электрода. В ходе эксперимента, который заключался в определении высоты руки относительно электрода для максимального увеличения напряжения, выяснилось, что электрод не очень чувствительным к высоте расположения руки. Исходя из этого было принято решение, что все последующие измерения длины пластин будут выполняться на расстоянии примерно 1,5 см. Напряжение без руки составило 10,10 В, что 2,34 раза выше, чем на выходе каскада операционных усилителей. Это связано с влиянием окружающей среды на электрод.

Таблица 3

**Зависимость напряжения от длины электрода**

Длина электрода, см	8	10	11,5	15	20	23,5	25	30
Среднее напряжение, В	9,95	9,93	10,03	10,14	10,19	10,19	10,07	10,07

Согласно проведенному эксперименту по нахождению оптимальной длины электрода наибольшее значение среднего напряжения составило 10,19 В. Такое значение получилось при значениях 20 см и 23,5 см. Было выбрано значение 20 см, так как это сократит влияние внешних факторов на пластину.

Так как относительно значения напряжения без приближения к датчику человека изменение составило всего 0,09 В, то эталонный конденсатор должен иметь небольшую емкость, так как конденсаторы с емкостью в несколько нФ не позволят определять изменение емкости на электроде из-за того, что напряжение достигнет напряжения питания устройства. В ходе подбора номинала конденсатора были проверены порядка десяти конденсаторов с емкостью от 675 пФ до 10 пФ. По результатам исследования был выбран конденсатор 10пФ, так именно такая емкость вносит наименьшее влияние на изменение выходного напряжения, а следовательно, позволяет регистрировать изменение емкости электрода при приближении к нему руки человека.

Таблица 4

**Влияние эталонного конденсатора на выходное напряжение**

	Без эталонного конденсатора	С эталонным конденсатором
Напряжение без руки, В	10,10	9,1
Напряжение с рукой, В	10,19	9,27

После всех экспериментов по созданию емкостного датчика приближения человека был собран макет устройства и проверена его работоспособность при приближении в различных положениях руки человека.

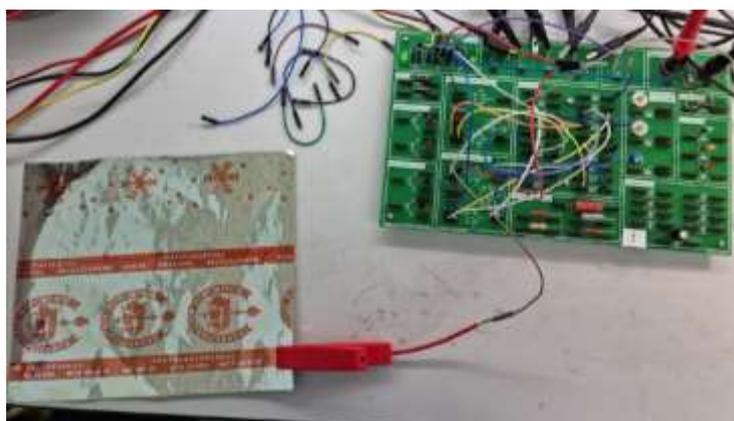


Рис. 3. Итоговая схема устройства

### Список литературы

1. Ершов М. «Емкостный датчик»//журнал. «Радио» 2004 / 3, с. 41

## МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТКИ ДЛЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

Н.А. Полуэктова, Д.А. Шишкина, А.М. Голштейн, И.А. Шишкин

*ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева»*

**Аннотация.** В данной работе предложена методика изготовления контактной сетки для фоточувствительных структур на основе пористого кремния с использованием лазерного излучения для формирования канавок. Представлен анализ вольт-амперных характеристик полученных структур.

**Ключевые слова:** *кремниевые фоточувствительные структуры, пористый кремний, лазерное излучение*

### **Введение**

В настоящее время научные работы по улучшению энергетических характеристик фоточувствительных структур весьма актуальны. Например, в работе [1] представлен обзор литературы о методах создания кремниевых наноструктур на солнечных элементах для улучшения их выходных характеристик. В работе [2] было показано, что пористые слои действительно повышают характеристики фоточувствительных структур, однако существует вероятность потери тока из-за неравномерного осаждения металлических контактов на порах. В данной работе предлагается обрабатывать поверхность фоточувствительных структур лазерным излучением перед напылением для создания канавок для контактных дорожек, что должно способствовать снижению потерь.

### **Эксперимент**

Перед созданием светочувствительных структур образцы промывали в растворе перекиси аммиака для удаления механических примесей с их поверхности.

Затем на образцы был нанесен диффузант: бор для проводимости p-типа, фосфорный для n-типа. После сушки диффузантов структуры отжигали в диффузионной печи в течение 40 минут при 1000°C для создания p-n перехода.

Далее был сформирован пористый слой на n-типе методом анодного электрохимического травления. Травление проводили в растворе плавиковой кислоты и этилового спирта в соотношении 1:1. Плотность тока составляла  $j = 15 \text{ мА/см}^2$  и  $20 \text{ мА/см}^2$ , а время травления составляло 10 и 15 минут.

Чтобы определить наилучший способ создания канавок для контактов, светочувствительные структуры были разделены на две группы: одна часть облучалась на воздухе, другая — в растворе этилового спирта и глицерина в соотношении 1:1. Канавки были созданы с помощью CO<sub>2</sub>-лазера. В обеих группах образцы облучали лазерным излучением с частотой  $f = 20 \text{ кГц}$  и мощностью  $P = 10 \text{ Вт}$ .

Перед нанесением контактов было измерено удельное сопротивление в разных областях пластины: перед травлением, на пористом кремнии и на дорожках. После этого алюминиевые контакты были нанесены термическим испарением в вакууме.

Вольт-амперные характеристики были измерены для обеих групп образцов. В качестве контрольного образца использовалась фоточувствительная структура без пористого слоя и контактных дорожек.

### Результаты и обсуждения

В табл. 1 приведены результаты измерений удельного и поверхностного сопротивления полученных структур.

Таблица 1

#### Удельное и поверхностное сопротивление фоточувствительных структур

№	Среда обработки	Тип поверхности	Удельное сопротивление, Ом*см	Поверхностное сопротивление, кОм/см <sup>2</sup>
2	глицерин: этиловый спирт	por-Si после скрайбирования	0,214	0,0095
8	воздушная	por-Si после скрайбирования	0,133	5,4
1	пористый кремний без скрайбирования		0,199	0,010

Заметно влияние среды на удельное и поверхностное сопротивление конструкций. Обработка в глицерине сохранила параметры удельного и поверхностного сопротивления относительно исходных. В то же время этот вид обработки позволяет получать менее дефектные структуры.

На рис. 1 приведены результаты измерений вольт-амперных характеристик фоточувствительных структур, контактные дорожки которых выполнены в различных средах: в спиртовом растворе глицерина (а) и на воздухе (б).

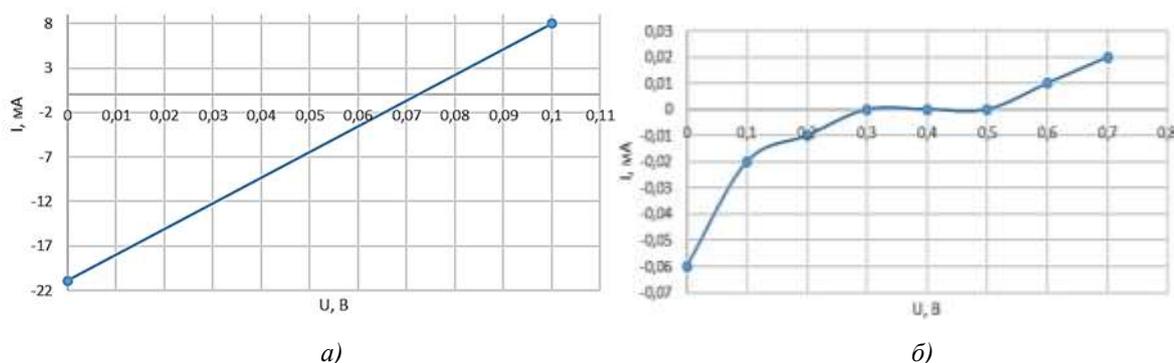


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика фоточувствительных структур с пористым слоем, контактные дорожки которых выполнены в спиртовом растворе глицерина (а) и на воздухе (б).

Из графиков видно, что образец, контактные дорожки которого были получены лазерным облучением в растворе глицерина и спирта, демонстрирует более высокие значения тока, однако образец, полученный лазерным облучением на воздухе, имеет более высокие значения напряжения холостого хода.

На рис. 2 показаны результаты измерений вольт-амперных характеристик фоточувствительной структуры, контактные дорожки которой выполнены без использования лазерного излучения.

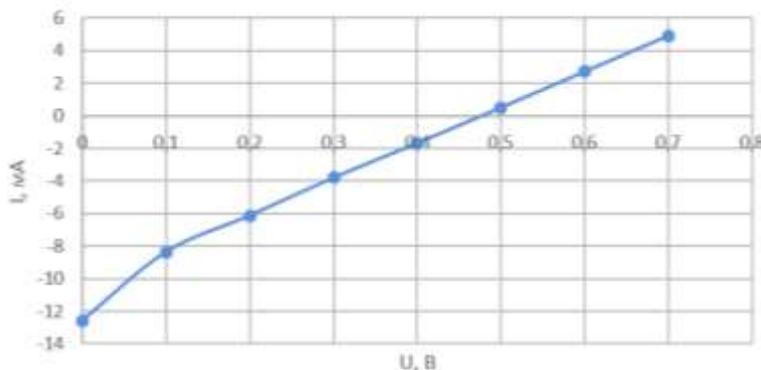


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фоточувствительной структуры, контактные дорожки которой выполнены без использования лазерного излучения.

При сравнении графиков с рисунков 1 и 2 видно, что напряжение холостого хода образцов с контактами, изготовленными с использованием лазера в воздушной среде (рис.1 (б)), совпадает с напряжением образца, изготовленного без использования лазера. А ток короткого замыкания образца, изготовленного с помощью лазера в растворе глицерина и спирта, имеет меньший ток короткого замыкания.

### Заключение

Анализ графиков показывает, что изготовление фоточувствительных структур с использованием лазера в растворе глицерина и спирта может улучшить характеристики структур, но технология изготовления нуждается в доработке.

### Список литературы

1. Huo, C., Wang, J., Fu, H., Li, X., Yang, Y., Wang, H., ... & Peng, K. Q. (2020). Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon in Oxidizing HF Solutions: Origin, Mechanism, Development, and Black Silicon Solar Cell Application. *Advanced Functional Materials*, 30(52), 2005744.
2. Латухина, Н. В., Лизункова, Д. А., Шишкин, И. А., & Ерофеев, А. С. (2019). Космические и наземные испытания экспериментальных фотоэлементов на базе пористого кремния, находящихся на борту» АИСТ-2Д». *Оптика спектроскопия конденсированных сред* (с. 329-332).

## ОБЗОР ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Д.Г. РАДАЙКИН, А.А.БОБКОВ

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

**Аннотация.** В настоящее время наблюдается высокий уровень загрязнения водных ресурсов. Поэтому исследователи сосредоточили свое внимание на поиске новых, передовых технологий в области фильтрации воды. Эти разработки связаны в основном с мембранной технологией разделения и фотокаталитическим разложением химических загрязнителей. В данном обзоре представлены последние достижения в области исследования новых наноматериалов для эффективной очистки водных ресурсов.

**Ключевые слова:** мембраны, фотокатализ, наноматериалы, очистка воды

Вода является основным источником жизни на Земле, поэтому загрязнение воды — это серьёзная проблема для всего человечества [1]. Можно выделить несколько основных причин ухудшения качества водных ресурсов: нефть, химические вещества, твердотельные отходы производств и сброс канализационных отходов [2].

Нанотехнологии являются мощным инструментом для создания материалов с уникальными свойствами, таких как наномембраны и нанокompозиты, которые также найдут особое применение в области очистки воды. Рассмотрим методы синтеза этих материалов. Для создания наномембран используются различные методы, такие как модифицированный метод Хаммерса [3], сольвотермический [4] и микроволновый метод [5]. Модифицированный метод Хаммерса является одним из наиболее распространенных методов, используемых для синтеза наномембран, таких как оксид графена [3].

Однако для синтеза наномембран из других материалов, таких как дисульфид молибдена, стоит использовать микроволновый метод [5]. Одна из известных разработок в данной области была сделана Яни и его коллегами, которые создали нанопористые мембраны из анодного оксида алюминия с заданными функциями, параметрами и свойствами [6]. Точно так же Мэй и его коллеги изготовили ультратонкие пористые кристаллические наномембраны AlN/GaN различной конфигурации, включая трубки, спирали и изогнутые листы [7].

Следующий уникальный материал, синтез которого также заслуживает внимания, это нанокompозиты. Эти материалы обладают уникальными свойствами в результате сочетания неорганических или органических составляющих на молекулярном уровне [8].

Для синтеза этих наноматериалов используется гидротермальный метод [9], химическое осаждение из паровой фазы (CVD) [10] и однореакторный синтез [11]. Работа Чжао и его коллег рассматривает синтез наночетов TiO<sub>2</sub> с использованием гидротермального метода с последующим прокаливанием.

Результаты показали сильную фотокаталитическую способность и удовлетворительную стабильность при повторном использовании, что повышает их ценность для практического применения в очистке воды [9].

Используя CVD, Янг и его команда синтезировали вертикально ориентированную гибридную мембрану из углеродных нанотрубок для разделения газов. Данная мембрана демонстрирует отличную разделительную способность с высокой пропускаемостью и стабильностью сопротивления после 50 циклов деформации растяжением [12].

Теперь рассмотрим более подробно практическое применение рассмотренных выше наноматериалов. Процесс фильтрации является одним из вариантов улучшения качества воды, в результате происходит удаление твердых частиц или газов из жидкостей при помощи фильтрующих материалов [13]. Отметим, что в 19-м и 20-м веках в технологиях фильтрации воды произошли большие изменения, такие как развитие метода обратного осмоса [14], мембранной технологии [15] и фотокаталитического разложения [16].

Опреснение воды стало более эффективным именно с развитием нанотехнологий, они расширили возможности манипуляции над свойствами материалов, что позволило обеспечить более высокую проницаемость мембран [17]. В работе [18] был сделан акцент на нанокompозитные мембраны, так, например, при комбинации графена с диоксидом титана наблюдалось улучшение механических свойств и селективности материала. Также исследователи сосредоточили своё внимание на нанопористых мембранах с диаметром пор от 1 до 100 нм, состоящих из таких материалов как графен и дисульфид молибдена. Эти материалы позволили достигнуть высокой водопроницаемости и способности задерживать соли [19]. В работе [20] было отмечено, что многослойные мембраны имеют более долгий срок службы и высокую эффективность в процессах фильтрации.

Существуют также адсорбционные методы фильтрации воды. Они основаны на процессе возникновения связи между молекулами вещества (ионами или атомами)

с другой поверхностью за счет химического или физического притяжения [21]. Как известно, выделяют два основных типа адсорбции: физическая (физадсорбция) и химическая (хемосорбция). Стоит отметить, что физическая адсорбция повышает эффективность мембран с точки зрения мощности потока воды, пропускаемого сквозь них, гидрофильности и защиты от обрастания [22]. Например, в работе [23] микрофильтрационная мембрана PVDF (поливинилиденфторид) была экспериментально модифицирована амфифильными сополимерами для фильтрации воды.

Результаты показали значительное улучшение проницаемости мембраны PVDF с отличными противообрастающими свойствами без какого-либо влияния на структуру мембраны [23]. В свою очередь можно отметить, что хемосорбция широко используется при очистке промышленных сточных вод для удаления тяжелых металлов [24].

Мембранная технология играет важную роль в области очистки вод. Например, для эффективного удаления урана были синтезированы цеолитовые имидазолатные каркасы, которые имеют высокую адсорбционную способность (540,4 мг/г) [25]. Но помимо цеолитов также используются материалы на основе углерода и оксидов металлов. Так углеродное нановолокно (УНВ) [26] и оксид графена [27] показали самую высокую способность адсорбции токсичных металлов 341,2 и 288 мг/г, соответственно. Кроме того, мембраны на основе углерода использовались для удаления других токсичных соединений, таких как молекулы хлороформа ( $\text{CHCl}_3$ ), масел и органических растворителей, а также типичных фармацевтических препаратов [28, 29].

В свою очередь оксиды металлов, включая  $\text{ZnO}$  и  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ , показали хорошую адсорбционную способность по удалению ионов бария и урана с 64,4 и 119,9 мг/г, соответственно. Высокая адсорбционная способность оксидов металлов обусловлена ионной связью [30].

С другой стороны, нанокompозитные материалы, такие как дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), показывают отличительные свойства в фотокаталитической деградации органических загрязнителей [31]. Стоит отметить, что фотокатализ является экологически чистым методом удаления многих загрязнителей, таких как оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), пестицидов и других органических загрязнителей, с использованием ультрафиолетового (УФ) излучения или солнечного света [32]. В 2020 году при помощи анодного окисления и гидротермального синтеза были синтезированы нанотрубки  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ , которые эффективно обеззараживают воду. Результаты показали превосходную фотокаталитическую дезинфекцию от бактерий (до 98,5%) под воздействием видимого света с возможностью повторного использования нанокompозита и его эффективной переработки [33]. Сам по себе диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) считается отличным материалом для удаления органических загрязнителей [34]. Это связано с высокой фотокаталитической активностью материала и его безопасностью для экологии [35]. Нанокompозиты на основе  $\text{TiO}_2$  в сочетании с углеродом ( $\text{C}/\text{TiO}_2\text{NT}$ ) показывают высокую фотокаталитическую активность разложения метилового оранжевого (до 100%) при УФ-свете [36].

В работе [37] были синтезированы титанатные нанотрубки нанесенные на  $\text{TiO}_2$  ( $\text{TiO}_2/\text{TiNT}$ ) для удаления  $\text{Cu(II)}$  и фенантрена под действием УФ-света. В результате наблюдалась высокая способность адсорбировать  $\text{Cu(II)}$  до 115 мг/г и для фенантрена эффективность разложения составила более 95% [37]. Кроме  $\text{TiO}_2$  высокую фотокаталитическую активность демонстрирует  $\text{ZnO}$ , так эффективность разложения данным материалом метилового синего и метилового оранжевого достигает 80,4% [38].

Наноматериалы на основе углерода также имеют способность проводить высокоэффективный процесс фотокатализа, их способность разлагать токсичные вещества может достигать 99% [39].

Анализируя современные достижения в области очистки сточных вод, было отмечено, что лидирующие места занимают мембранные технологии и фотокатализаторы на основе наноматериалов. Благодаря своим уникальным свойствам, они способны эффективно проводить процесс разложения высокотоксичных веществ и адсорбировать опасные металлы, что очень важно в современной экологической реалии.

### Список литературы

1. Cosgrove W.J., Loucks D.P. Water management: Current and future challenges and research directions // *Water Resour. Res.* 2015. 51. P. 4823–4839.
2. Daud, M., Nafees M. et al. Drinking water quality status and contamination in Pakistan // *BioMed Res. Int.* 2017. 2017. 7908183.
3. Chen J., Yao B. et al. An improved Hummers method for eco-friendly synthesis of graphene oxide // *Carbon* 2013. 64. P. 225–229.
4. Yahaya N.Z.S.; Paiman S.H. et al. Synthesis and characterizations of MIL-140B-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/YSZ ceramic membrane using solvothermal method for seawater desalination // *J. Aust. Ceram. Soc.* 2020. 56. P. 291–300.
5. Dahiya M.S., Tomer V.K. et al. Metal–ferrite nanocomposites for targeted drug delivery. In *Applications of Nanocomposite Materials in Drug Delivery* // Woodhead Publishing: Sawston, UK. 2018. P. 737–760.
6. Jani A.M., Anglin E.J. et al. Nanoporous anodic aluminium oxide membranes with layered surface chemistry // *Chem. Commun.* 2009. 21. P. 3062–3064.
7. Mei Y., Thurmer D.J. et al. Fabrication, self-assembly, and properties of ultrathin AlN/GaN porous crystalline nanomembranes: Tubes, spirals, and curved sheets // *Acs Nano.* 2009. 3. P. 1663–1668.
8. Malhotra B.D., Ali A. Nanomaterials in biosensors: Fundamentals and applications // In *Nanomaterials for Biosensors*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2018. P. 1–74.
9. Rane A.V., Kanny K. Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites // In *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*; Woodhead Publishing: Sawston, UK. 2018. P. 121–139.
10. Manawi Y.M., Samara, A. et al. review of carbon nanomaterials' synthesis via the chemical vapor deposition (CVD) method // *Materials.* 2018. 11. 822.
11. Zhong Q., Cao M. et al. One-pot synthesis of highly stable CsPbBr<sub>3</sub>@ SiO<sub>2</sub> core– shell nanoparticles // *Acs Nano.* 2018. 12. P. 8579–8587.
12. Yang D., Tian D. Carbon nanotube arrays hybrid membrane with excellent separation performance and conductivity // *J. Membr. Sci.* 2021. 620. 118874.
13. Hotza D., Di Luccio M. et al. Silicon carbide filters and porous membranes: A review of processing, properties, performance, and application // *J. Membr. Sci.* 2020. 610. 118193.
14. Judd S.J. Membrane technology costs and me // *Water Res.* 2017. 122. P. 1–9.
15. Baker R.W. *Membrane Technology and Applications* // John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. 2012.
16. Umar M., Aziz H.A. Photocatalytic degradation of organic pollutants in water // *Org. Pollut.-Monit. Risk Treat.* 2013. 8. P. 196–197.
17. Homaeigohar S., Elbahri M. Graphene membranes for water desalination // *NPG Asia Mater.* 2017. 9. 427.
18. Ibrahim Q., Akbarzadeh R. A photocatalytic TiO<sub>2</sub>/graphene bilayer membrane design for water desalination: A molecular dynamic simulation // *J. Mol. Modeling* 2020. 26. 165.
19. Cohen-Tanugi D., Grossman J.C. Water desalination across nanoporous graphene // *Nano Lett.* 2012. 12. P. 3602–3608.
20. Nunes S.P., Culfaz-Emecen P.Z. Thinking the future of membranes: Perspectives for advanced and new membrane materials and manufacturing processes // *J. Membr. Sci.* 2020. 598. 117761.
21. Rashed M.N. Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater // *Org. Pollut.-Monit. Risk Treat.* 2013. 7. P. 167–194.
22. Zhou R., Ren P.-F. Fabrication of antifouling membrane surface by poly(sulfobetaine methacrylate)/polydopamine co-deposition // *J. Membr. Sci.* 2014. 466. P. 18–25.
23. Peng B., Li Y. Facile surface modification of PVDF microfiltration membrane by strong physical adsorption of amphiphilic copolymers // *J. Appl. Polym. Sci.* 2013. 130. P. 3112–3121.
24. Matouq M., Jildeh N. The adsorption kinetics and modeling for heavy metals removal from wastewater by Moringa pods // *J. Environ. Chem. Eng.* 2015. 3. P. 775–784.

25. Liu Y., Huo Y. et al. Impact of metal ions and organic ligands on uranium removal properties by zeolitic imidazolate framework materials // J. Clean. Prod. 2021. 278. 123216.
26. Yu S., Liu Y. Rational design of carbonaceous nanofiber/Ni- Al layered double hydroxide nanocomposites for high-efficiency removal of heavy metals from aqueous solutions // Environ. Pollut. 2018. 242. P. 1–11.
27. Reynosa-Martínez A.C.G., Tovar N. et al. Effect of the degree of oxidation of graphene oxide on As(III) adsorption. J. Hazard. Mater. 2020. 384. 121440.
28. Tian Y.L., Hua H.L. et al. Adsorption properties of chloroform molecule on graphene: Experimental and first-principles calculations // Mod. Phys. Lett. B 2017. 31. 1750335.
29. Ren X., Feng J. Enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate by S, N co-doped graphene via controlling S, N functionalization for the catalytic decolorization of dyes in water // Chemosphere 201. 210. P. 120–128.
30. Parkinson G.S., Diebold U. Adsorption on metal oxide surfaces // Surf. Interface Sci. Solid-Gas Interfaces II. 2016. 6. P. 793–817.
31. Zalfani M., van der Schueren B. et al. ZnO quantum dots decorated 3DOM TiO<sub>2</sub> nanocomposites: Symbiose of quantum size effects and photonic structure for highly enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants // Appl. Catal. B Environ. 2016. 199. P. 187–198.
32. Jiang Q., Wang S. et al. Controllable growth of MoS<sub>2</sub> nanosheets on TiO<sub>2</sub> burst nanotubes and their photocatalytic activity // RSC Adv. 2020. 10. P. 40904–40915.
33. Yan H., Liu L. Binary composite MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanotube arrays as a recyclable and efficient photocatalyst for solar water disinfection // Chem. Eng. J. 2020. 401. 126052.
34. Cai Z., Dwivedi A.D. et al. Application of nanotechnologies for removing pharmaceutically active compounds from water: Development and future trends // Environ. Sci. Nano 2018. 5. P. 27–47.
35. Zheng L., Teng F. et al. Photo/electrochemical applications of metal sulfide/TiO<sub>2</sub> heterostructures // Adv. Energy Mater. 2020. 10. 1902355.
36. Wang X., Wang L.L. et al. Fabrication and photocatalytic performance of C,N,F-tridoped TiO<sub>2</sub> nanotubes. Catal. Today 2019. 327. P. 182–189.
37. Cheng K., Cai Z. et al. Synergistic adsorption of Cu(II) and photocatalytic degradation of phenanthrene by a jacobite-like TiO<sub>2</sub>/titanate nanotube composite: An experimental and theoretical study // Chem. Eng. J. 2019. 358. P. 1155–1165.
38. Nie Q., Xie Y. et al. High piezo-catalytic activity of ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosheets utilizing ultrasonic energy for wastewater treatment // J. Clean. Prod. 2020. 242. 118532.
39. Wang X.L., Li, J. et al. Synthesizing pyridinic-N dominate-doped graphene/BiVO<sub>4</sub> nanocomposite as a superior photo-catalyst for degradation under visible-irradiation // Opt. Mater. 2021. 114. 110922.

## **СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОГО И ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ПРИНЦИПОВ НАГРЕВА ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ МИНИАТЮРНЫХ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПЦР-АНАЛИЗА**

И. Д. СЕМЕНЕНКО, А. В. ПУДОВА, Т. М. ЗИМИНА

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

**Аннотация.** Работа посвящена сравнительному исследованию двух принципов нагрева для микротермоциклирования, а именно, терморезистивного и индукционного. Исследование позволяет сделать вывод о большей эффективности индукционного метода, позволяющего увеличить скорость нагрева, а следовательно, сократить время клинического ПЦР-анализа.

**Ключевые слова:** термоциклирование, ПЦР-анализ, микронагреватель, индукционный нагрев, терморезистивный нагрев.

Полимеразная цепная реакция (ПЦР) широко применяется в клинической медицине для генотипирования благодаря своей специфичности и способности создавать большое количество скопированных фрагментов ДНК из крошечных количеств образцов. В последнее время миниатюрные устройства с ПЦР-чипом вызвали большой интерес

благодаря своим многочисленным преимуществам по сравнению с обычными приборами для ПЦР, таким как портативность, более высокая скорость термоциклирования и значительно меньшее потребление реагентов и образцов.

Все системы ПЦР состоят из трех компонентов: реакционной камеры, термоциклера и анализатора продуктов ПЦР. Речь идет как о ПЦР-чипах со статической камерой, так и о динамическом потоке через ПЦР-чипы. Чипы для ПЦР изготавливаются из различных материалов, таких как кремний, стекло, полиуглеродистая сталь, полиамид. Для термоциклирования может использоваться как бесконтактный нагрев (индукционный или ИКизлучение), так и контактный (джоулев). [1]

Известен ряд чиповых устройств для ПЦР со статической камерой, в частности, используется система микро-ПЦР, в которой температура микрореактора контролируется двумя термоэлектрическими устройствами Peltier, с расположенным между ними реактором [2]. Описанный ПЦР-чип изготовлен из поликарбоната методом лазерной абляции.

Для обнаружения амплифицированных продуктов после термоциклирования использовали коммерческий флуоресцентный анализатор. Лин (2000) [3] и Ли (2004) [4] разработали систему ПЦР с реакционной лункой, изготовленной в кремниевой пластине, запечатанной стеклянной подложкой, и поместили нагреватель на дно кремниевой пластины. В их конструкции был использован небольшой реакционный объем для повышения однородности температуры. Для анализа ампликонов использовали гель-электрофорез. Группа Нагаи (2001) [5] и группа Мацубары (2004) [6] представили матрицы ПЦР-реакторов, выполненных профилированием на кремниевой пластине. Описано также применение коммерческих термоциклеров, в которых для измерения интенсивности флуоресценции продуктов ПЦР использовали флуоресцентную микроскопию или микросканер. Объем ПЦР-ячейки был снижен до нанолитра [7].

При реализации миниатюрного варианта ПЦР-реактора большое значение имеет выбор физического принципа нагрева. Актуальными являются принципы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

### Физические принципы нагрева

№ п/п	Физический принцип	Достоинства	Недостатки
1	Терморезистивный	Простота устройства; Способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках; Малые габариты, что существенно для измерений температуры малых объектов;	Наиболее существенным недостатком терморезисторов является большой разброс параметров в пределах 20%.
2	Индукционный	Высокоскоростной разогрев любого электропроводного материала; Возможен нагрев в жидкости; Легко провести местный и избирательный нагрев	Требуется достаточно мощный источник электроэнергии для питания устройства индукционного нагрева

3	ИК излучение	Направленное нагревание предмета; Прямой вид нагревания совершается без кислородного сжигания; Прогрев осуществляется равномерно и охватывает всю поверхность; Скоростная передача тепла; Экономичное потребление электроэнергии; Попадание влаги и других веществ на ИК-нагреватель не несут негативного воздействия;	При использовании ИК излучателей в качестве нагрева следует просчитывать мощность; Высокая стоимость излучателя; Малая эффективность передачи энергии
4	СВЧ-нагрев	Возможность применения новых необычных видов нагрева, например избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося	низкий КПД; Высокая стоимость и сложность оборудования; Возможность утечки СВЧ-поля;

Однако воплощение данных принципов с помощью МЕМС технологий, не всегда приводит к эффективным результатам. В данной работе с этой точки зрения рассматриваются терморезистивный (наиболее распространенный) и индукционный принципы нагрева. Рассмотрим физические основы данных принципов.

При прямом электронагреве преобразование электрической энергии в тепловую происходит в результате прохождения электрического тока непосредственно по нагреваемому телу или среде (металл, вода, почва и т. п.). При косвенном электронагреве электрический ток проходит по специальному нагревательному элементу, от которого тепло передается нагреваемому телу или среде посредством теплопроводности, конвекции или излучения.

Протекание электрического тока по электропроводящим твердым телам или жидким средам сопровождается выделением тепла. По закону Джоуля — Ленца количество тепла  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ , где  $Q$  — количество, тепла, Дж;  $I$  — сила тока, А;  $R$  — сопротивление тела или среды, Ом;  $t$  — время протекания тока, с.

Терморезистивный нагрев может быть осуществлен контактным и бесконтактным способами.

Контактный способ применяется для нагрева токопроводящих веществ как по принципу прямого электрического нагрева, например в аппаратах электроконтактной сварки, так и по принципу косвенного электрического нагрева — в нагревательных элементах.

Индукционный нагрев аналогичен эффекту нагрева Джоуля, но с одной важной модификацией. Токи, которые нагревают материал, индуцируются с помощью электромагнитной индукции; это бесконтактный процесс нагрева. При подаче высокочастотного переменного тока на индукционную катушку создается изменяющееся во времени магнитное поле. Нагреваемый материал, известный как заготовка, помещается внутри магнитного поля, не касаясь катушки. Стоит обратить внимание, что не все материалы могут нагреваться индукционным способом, а только ферромагнетики. Переменное электромагнитное поле индуцирует вихревые токи в заготовке, что приводит к потерям на сопротивление, которые затем нагревают материал. Таким образом, для осуществления джоулевого нагрева мы используем нихром, а для индукционного — ферромагнитный материал.

Как было показано ранее в патенте «Микрореактор для химического и генетического тестирования», повышение скорости анализа возможно при снижении объема реактора. Так в реакторе объемом 4 нанолитра скорость нагрева от 20 °С до 90 °С составила не менее 70 °С·с<sup>-1</sup>. Поэтому в данной работе мы ориентировались на объем реактора 4 нанолитра.

Разработанный вариант топологии нагревателя показан на рис. 1:

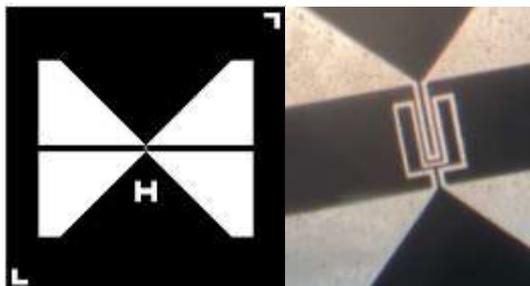


Рис. 1. Вариант топологии конструкции нагревателя и датчика температуры.

Данная топология представлена в двух вариантах, первый- для терморезистивного нагрева из трех слоев (рис.2 а), второй- для индукционного нагрева из пяти слоев, новые из которых — планарная индукционная катушка и изоляция (рис.2 б)

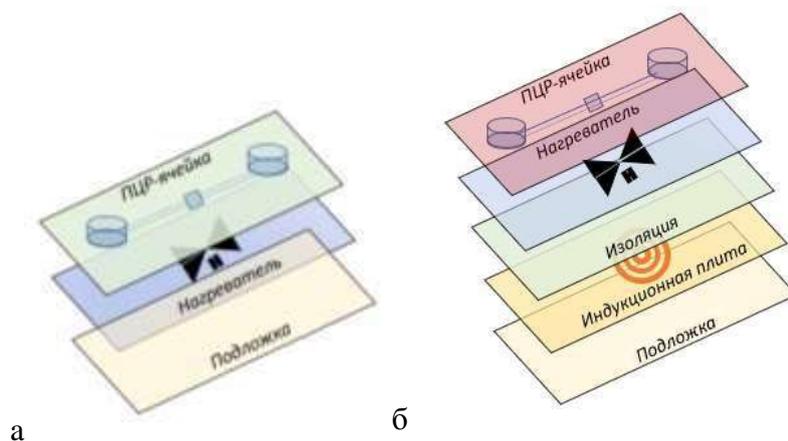


Рис. 2. Структура реактора на основе терморезистивного (а) и индукционного (б) нагрева.

Проведено сравнительное исследование с использованием ПЦР-«жюктейля» для обнаружения вируса, полученного из института гриппа имени Смородинцева.

### Список литературы

1. Пат. 2171467 Российская Федерация, МПК7 G 01 N 27/00. Микрореактор для химического и генетического тестирования / Лучинин В. В., Корляков А.В., Зимина Т.М., Никитин И.В.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Центр технологий микроэлектроники. — № 2000116849/28; заявл. 30.06.00; опубл. 27.07.01, 3–5 с.
2. J. Yang, Y. Liu, C.B. Rauch, R.L. Stevens, R. Liu, R. Lenigk, and P. Grodzinski, Lab. Chip. 2, 179–187 (2002).
3. Y.C. Lin, C.C. Yang, and M.Y. Huang, Sensor. Actuat. B-Chem. 71, 127–133 (2000).
4. D.S. Lee, S.H. Park, H.S. Yang, K.H. Chung, T.H. Yoon, S.J. Kim, K.W. Kim, and Y.T. Kim, Lab Chip. 4, 401–407 (2004a).
5. H. Nagai, Y. Murakami, K. Yokoyama, E. Tamiya, and Y. Morita, Anal. Chem. 73, 1043–1047 (2001).
6. Y. Matsubar a, K. Kerman, M. Kobayashi, S. Yamamura, Y. Morita, Y. Takamura, and E. Tamiya, Anal. Chem. 76, 6434–6439 (2004).

7. Zhang, C., Xu, J., Ma, W., & Zheng, W. (2006). PCR microfluidic devices for DNA amplification. *Biotechnology Advances*, 24(3), 243–284.

## НИЗКОВОЛЬТНЫЕ АВТОЭМИССИОННЫЕ КАТОДЫ НА БАЗЕ НОВЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СПЕКТРОСКОПИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Р.С. СМЕРДОВ

*Санкт-Петербургский Горный университет*

**Аннотация.** Теоретический анализ разрешающей способности систем EEL показывает, что ширина энергетического спектра электронов источника является основным фундаментальным фактором, ограничивающим рост энергетического разрешения метода. В работе проведен расчет и сравнение энергетического и временного разрешения EELS, использующей разработанный низкопороговый катод нового типа, с соответствующими параметрами как классической системы, так и системы с перспективным эмиттером на базе углеродных нанотрубок. Полученные результаты свидетельствуют о наличии значительного роста энергетической и временной разрешающей способности, а также снижения порога детектирования следовых концентраций химических элементов при сохранении высоких значений плотности эмиссионного тока.

**Ключевые слова:** *электронно-зондовый анализ, разрешающая способность, характеристические потери, низковольтная эмиссия, наноструктурированный катод.*

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 21-19-00139

### **Введение**

Спектроскопия характеристических потерь энергии электронов (EELS) является мощным инструментом получения данных об элементном составе, типе химических связей, фоновой структуре и оптических свойствах материалов. Решение задачи дальнейшего увеличения энергетической и временной разрешающей способности EELS актуально как для создания физических и математических информационных моделей эмиссии электронов [1, 2], так и с целью повышения точности анализа элементного и фазового состава анализируемых поверхностей в наномасштабе [3, 4, 5, 6]. Согласно приведенному в [7] теоретическому рассмотрению уменьшение тянущего напряжения  $V_e$  приводит к сужению пика нулевых потерь [8, 9, 10], однако сопровождающемуся падением плотности эмиссионного тока электронов, а значит, уменьшением яркости электронной пушки и отношения сигнал шум. Именно этим обусловлена необходимость разработки и применения автоэмиссионных катодов нового поколения, демонстрирующих более низкие значения вытягивающего напряжения при сохранении или росте плотности эмиссионного тока для дальнейшего увеличения разрешающей способности EEL-систем.

**Цель работы** — разработка прототипа автоэмиссионного низкопорогового [1] катода для увеличения энергетической и временной разрешающей способности EELS.

### **Методология исследования**

На сегодняшний день широко используются несколько описывающих зависимость формы энергетического распределения от параметров эмиссии (в том числе вытягивающего напряжения и температуры) моделей энергетического распределения эмиттированных электронов, базирующихся на теории Фаулера-Нордгейма [9, 11, 12].

С использованием данных, представленных в работе [13, 14], и на базе теоретического обзора [9] была предложена следующая модель энергетического распределения электронов (1):

$$\frac{dj(E)}{dE} = \frac{4\pi me}{h^3} \exp\left(\frac{E-bW}{d}\right) \frac{1}{1 + e^{E/(k_B T)}} \quad (1)$$

где  $E$  – значение энергии электрона,  $T$  — температура,  $h$  — постоянная Планка,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $W$  — работа выхода электрона с поверхности материала при отсутствии внешнего электрического поля,  $b$  — параметр, зависящий от значения снижения работы выхода по механизму Шотки [9],  $m$  и  $e$  — масса и заряд электронов соответственно. Вероятность туннелирования электронов через потенциальный барьер  $d$  зависит от значения работы выхода  $W$ , потенциала зарядов изображения и напряженности локального электрического поля  $F$  вблизи поверхности материала с учетом ее морфологии и может быть представлена в виде (2):

$$d = \frac{ehF}{4\pi(y_0)\sqrt{2mW}}, \quad (2)$$

где  $y_0 = \frac{\Delta W}{W} = \sqrt{\frac{e^3 F / 4\pi\epsilon_0}{W}}$  — параметр, характеризующий влияние сил зеркального отображения,  $\Delta W$  — снижение работы выхода электронов из материала за счет воздействия внешнего электрического поля.

### Результаты и обсуждение

Итог моделирования спектров энергетического распределения электронов представлен на рисунке 1. Стандартный металлический (золотой) катод с коэффициентом усиления поля  $\gamma \approx 100$  и работой выхода электронов с поверхности  $W = 5.3$  эВ характеризуется значением ширины на полувысоте (FWHM) энергетического спектра электронов 0,38 эВ. В результате исследований, проведенных совместно с R&D лабораторией «Тераностика» (Ю. М. Спивак, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), НИЛ «Самоорганизующиеся высокотемпературные наноструктуры» (П. Г. Габдуллин, СПбПУ), ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН и TESCAN CIS был разработан и синтезирован прототип низкопорогового автоэмиссионного катода [13, 14] на основе пористого кремния [15, 16], функционализированного углеродными структурами на базе фуллерена  $C_{60}$ . Результаты измерения и анализа эмиссионных характеристик прибора, представлены в [13, 14]. По плотности эмиссионного тока ( $j_{\max} = 6.28 \cdot 10^3$  мкА/см<sup>2</sup> для напряженности поля в зазоре  $F_{\max} = 7.5$  В/мкм) полученный прототип катода с низкой работой выхода ( $W = 0,36$  эВ) и  $\gamma \approx 100$  превосходит золотой эмиттер как для идентичных значений макроскопических полей, так и на один порядок ниже. Значение FWHM энергетического спектра электронов, эмиттируемых из полученного прототипа, составляет 0,17 эВ (рис. 1).

Благодаря достигнутому снижению ширины пика нулевых потерь энергии электронов на 0,21 эВ, обеспечен выигрыш в энергетической разрешающей способности системы (20 %) по сравнению с классическим автоэмиссионным катодом.

Для решения задачи дальнейшего увеличения временного разрешения EEL [17] систем требуется реализовать катоды нового типа, характеризующиеся более высокими значениями плотности эмиссионного тока. Зависимость временного разрешения EELS системы от плотности тока определяется следующим выражением [18] (3):

$$t_{\text{res}} = \frac{k^2}{JC^2\varepsilon(\text{DQE})}, \quad (3)$$

где  $J$  — плотность тока первичных электронов в пучке, поступающем к детектору,  $k = 5$  [18],  $C$  — контраст края поглощения (то есть характерное для края поглощения отношение сигнала к фону),  $\varepsilon$  — эффективность, значение которой зависит от параметров системы, в том числе типа сенсора и характеристик источника тока, используемых при получении и регистрации сигнала [18], а DQE — квантовая эффективность регистрации электронов.

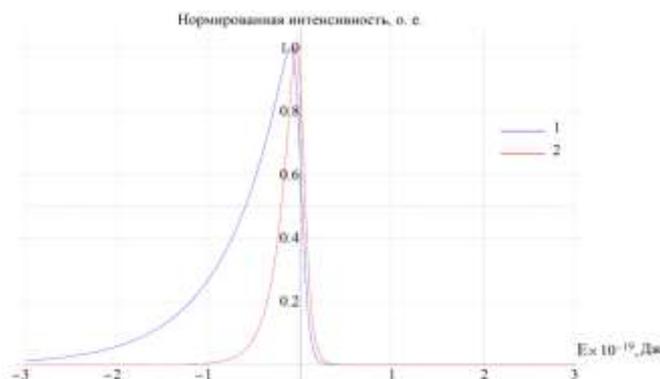


Рис. 1. Результат моделирования энергетических спектров электронов:  
 1. Классический автоэмиссионный катод (Au,  $W = 5.3$  эВ,  $F_{\text{loc}} = 10$  В/нм);  
 2. Прототип низкопорогового эмиттера [13, 14] ( $W = 0.36$  эВ,  $F_{\text{loc}} = 1$  В/нм).

Согласно представленной модели, благодаря увеличению плотности эмиссионного тока с поверхности в 1,2 раза применение разработанного низкопорогового катода позволяет добиться роста временного разрешения системы на 17 % по сравнению с системами EELS, использующими эмиттеры из углеродных нанотрубок [19, 20].

Квантовая эффективность регистрации напрямую зависит от модуляционной передаточной функции, которая, в свою очередь, определяется ФРЛ детектора и дисперсией электронов источника по энергии [18]. Согласно [17], для порога детектирования следовых концентраций химических элементов (минимальной атомной доли) справедливо (4):

$$MAF = \frac{3}{\sigma_k(\beta, \Delta)} \sqrt{\frac{4h\sigma_b(\beta, \Delta)}{\pi d^2 (J/e) \exp(-t/\lambda_e) N_t I(\beta, \Delta) (\text{DQE})}}, \quad (4)$$

где  $d$  — диаметр электронного зонда,  $\lambda_e$  — средняя длина свободного пробега первичных электронов для случая упругого рассеяния,  $t$  — толщина исследуемого образца в зоне облучения,  $\beta$  — значение полуугла сбора (угловой диапазон рассеянных электронов, попадающих в детектор),  $\Delta$  — энергетический диапазон,  $I(\beta, \Delta)$  — интенсивность сигнала в спектре малых потерь (плазмонный резонанс),  $N_t$  — поверхностная плотность атомов,  $\sigma_k(\beta, \Delta)$  — сечение рассеяния (основные потери),  $\sigma_b(\beta, \Delta)$  — сечение рассеяния всех процессов потерь энергии электронов, вносящих вклад в фон,  $h$  — коэффициент статистической ошибки (обычно в диапазоне от 5 до 10), возникающий в процессе вычитания фона [17]. Из анализа (4) следует, что порог детектирования сильно зависит от плотности тока источника электронов. Проведенный расчет показывает, что применение разработанных катодов позволяет обеспечить снижение порога детектирования следовых

концентраций химических элементов на 9 % по сравнению с системами, использующими электронные пушки на базе углеродных нанотрубок в качестве источников электронов.

### Заключение

Применение разработанного прототипа катода позволит обеспечить рост энергетического разрешения на 20% по сравнению с EEL-системой на базе золотого острейного холодного катода, а также рост временного разрешения и снижение порога детектирования следовых концентраций химических элементов на 17% и 9% соответственно по сравнению с перспективными EEL-системами на базе углеродных нанотрубок.

### Список литературы

1. Fursey G.N. et al. Low-Threshold Field Emission from Carbon Structures // *J. Synch. Investig.* 2019. Vol. 13, № 5. P. 814–824.
2. Sukhomlinov V. et al. Influence of Beam and Plasma Noise on the Instability of the «Fast Electron Beam–Confined Collisional Plasma» System. Kinetic Consideration // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2022. Vol. 91, № 2. P. 024501.
3. Spivak Y.M. et al. The Architectonics Features of Heterostructures for IR Range Detectors Based on Polycrystalline Layers of Lead Chalcogenides // *Crystals.* 2021. Vol. 11, № 9. P. 1143.
4. 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.
5. Kononova I. et al. Fractal-Percolation Structure Architectonics in Sol-Gel Synthesis // *IJMS.* 2021. Vol. 22, № 19. P. 10521.
6. Spivak Yu.M. et al. Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions // *Journal of Nanomaterials.* 2016. Vol. 2016. P. 1–8.
7. Смердов, Р. С. Разработка автоэмиссионных электродов на основе наноматериалов нового типа для увеличения разрешающей способности электронно-зондовых систем / Р. С. Смердов, Ю. М. Спивак, А. С. Мустафаев // *Наука настоящего и будущего.* — 2021. — Т. 1. — С. 168-170. — EDN EDXXSV.
8. Field electron emission properties of a supertip / A. Knoblauch, Ch. Wilbertz, Th. Miller, S. Kalbitzer. — DOI 10.1088/0022-3727/29/2/028 // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1996. — Vol. 29, № 2. — P. 470–473.
9. Fransen, M. J. Field emission energy distribution from individual multiwalled carbon nanotubes / M. J. Fransen, T. L. v. Rooy, P. Kruit. — DOI 10.1016/S0169-4332(99)00056-2 // *Appl. Surf. Sci.* — 1999. — Vol. 146. — P. 312–327
10. Knauer, W. Boersch effect in electron-optical instruments / W. Knauer. — DOI 10.1116/1.570271 // *Journal of Vacuum Science and Technology.* — 1979. — Vol. 16. — P. 1676–1679.
11. Forbes, R. G. Transmission coefficients for the exact triangular barrier: an exact general analytical theory that can replace Fowler and Nordheim’s 1928 theory / R.G. Forbes, J.H.B. Deane. — DOI 10.1098/rspa.2011.0025 // *Proceedings of the Royal Society A.* — 2011. — Vol. 467. — P. 2927–2947.
12. Jensen, K. L. 2D/3D image charge for modeling field emission / K. L. Jensen. — DOI 10.1116/1.4968007 // *Journal of Vacuum Science & Technology B.* — 2017. — Vol. 35. — P. 02C101-1–02C101-5
13. Advances in Novel Low-Macroscopic Field Emission Electrode Design Based on Fullerene-Doped Porous Silicon / R. Smerdov, Y. Spivak, I. Bizyaev, P. Somov, V. Gerasimov, A. Mustafaev, V. Moshnikov. — DOI 10.3390/electronics1001004 // *Electronics (Switzerland).* — 2021. — Vol. 10. — P. 1–13
14. Smerdov, R. S. The Investigation of a Novel Field Emission Cathode Prototype for Electron Microscopy Methods of Monitoring the Environment, Substances, Materials and Products / R. S. Smerdov, Yu. M. Spivak, I. S. Bizyaev. — DOI 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243983 // 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech) (St. Petersburg, Russia, 15-16 Oct. 2020) / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. — Piscataway, NJ: IEEE, 2020. — P. 212–215
15. Bobkov A. et al. Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-si, por-si incorporated by ni and metal oxides for gas sensors // *Sensors.* 2022. Vol. 22, № 4. P. 1530.
16. Spivak Y. et al. Improving the Conductivity of the PEDOT:PSS Layers in Photovoltaic Cells Based on Organometallic Halide Perovskites // *Materials.* 2022. Vol. 15, № 3. P. 990.
17. Egerton, R.F. Electron Energy-Loss Spectroscopy in the Electron Microscope / R. F. Egerton. — Boston: Springer, 2011. — 491 p.: ISBN 978-1-4419-9583-4.

18. Direct Detection Electron Energy-Loss Spectroscopy: A Method to Push the Limits of Resolution and Sensitivity / J. L. Hart, A. C. Lang, A. C. Leff, P. Longo, C. Trevor, R. D. Twisten, M. L. Taheri. — DOI 10.1038/s41598-017-07709-4 // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — P. 1–14.
19. Electron Gun Using a Field Emission Source / A. Crewe, D. Eggenberger, J. Wall, L. Welter. — DOI 10.1063/1.1683435 // Review Of Scientific Instruments. — 1968. — Vol. 39, №4. — P. 576–583
20. Knapек, A. Simulation and optimization of a carbon nanotube electron source / A. Knapек, T. Radlicka, S. Kratky. — DOI 10.1017/S1431927615013148 // Microscopy and Microanalysis. 2015. Vol. 21. P. 60–65.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ ОДНОРАЗОВОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СЕНСОРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВИНЦА В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

В.О. СМЕРНОВА<sup>1</sup>, А.В. ПУДОВА<sup>2</sup>

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

**Аннотация.** В рамках работы разработан лабораторный макет электрохимического сенсора для обнаружения ионов свинца. Определение свинца основано на принципе инверсионной вольтамперометрии. Проведено сравнительное исследование применимости медных и висмутовых рабочих электродов. Предел обнаружения сконструированного сенсора составил 70 мкМ.

**Ключевые слова:** электрохимический сенсор, трехэлектродная ячейка, рабочий электрод, определение свинца, медь, висмут

Быстрорастущий спрос на промышленность способствовал экономическому прогрессу, но также вызвал ряд экологических проблем. Среди них эффективная очистка от загрязнения тяжелыми металлами является приоритетной задачей во всем мире. Ионы тяжелых металлов, такие как Cd(II) и Pb(II), которые признаны наиболее серьезными загрязнителями, наносящими серьезный вред окружающей среде и, в свою очередь, приводящими к значительной опасности для здоровья человека даже при следовых концентрациях, плохо поддаются биологическому разложению и легко накапливаются в живых существах по биологической цепи. Поэтому разработка простой и надежной стратегии для обнаружения ионов тяжелых металлов становится все более актуальной [1].

Однако, сложные инструментальные методы анализа требуют высокой стоимости. Электрохимические датчики являются одними из лучших кандидатов в качестве инструментов обнаружения и количественного определения, которые обеспечивают дешевые, быстрые, удобные, надежные и чувствительные подходы к обнаружению целевых соединений в сложных матрицах, таких как образцы окружающей среды. Кроме того, они обычно представляют собой компактные системы по сравнению с другими обычными аналитическими системами [2].

При проведении исследований и анализа состава вещества часто необходимо определение низких концентраций. В этих случаях используют методы концентрирования определяемых веществ в сочетании с высокочувствительными инструментальными электрохимическими методами анализа и исследования. Одним из таких методов является инверсионная вольтамперометрия, которая является перспективным методом для определения ультрамалых концентраций элементов в объектах окружающей среды.

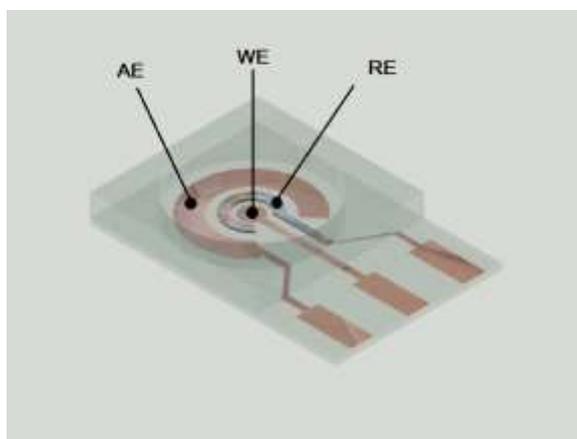
Сущность метода состоит в предварительном концентрировании анализируемого компонента на рабочем электроде с помощью различных электрохимических или

химических реакций, в том числе и за счет адсорбции, с последующим электрохимическим растворением концентрата при изменяющемся по заданному алгоритму потенциале. В процессе растворения происходит регистрация пика тока, который является аналитическим сигналом, т.к. прямо пропорционально зависит от концентрации компонента в исследуемом растворе [3].

Для любого рода электрохимических измерений необходима электрохимическая цепь с электрохимической ячейкой, составной частью которой является анализируемый раствор.

Для вольтамперометрических измерений используется трехэлектродная ячейка. Индикаторный электрод должен обратимо реагировать на изменение состава анализируемого раствора, чтобы по наличию (или отсутствию) аналитического сигнала и его интенсивности можно было судить о том, есть ли определяемый компонент в растворе и в каком количестве. Индикаторный электрод не должен реагировать с компонентами раствора, поэтому для их изготовления чаще всего применяют химически инертные токопроводящие материалы: благородные металлы (золото, платина), ртуть, углеродные материалы (графит, стеклоуглерод). Непременным условием вольтамперометрического анализа является применение электрода сравнения и вспомогательного электрода, поверхность которого в несколько раз выше, чем индикаторного. [4]

Топология используемой ячейки представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Модель планарной трехэлектродной ячейки.*

*AE — вспомогательный электрод, WE — рабочий электрод, RE — электрод сравнения.*

Для проведения экспериментов методом прямой печати были изготовлены макеты, представленные на рис. 2.



Рис. 2. Электрохимический сенсор с трехэлектродной системой.

Электрод сравнения получен электролитическим нанесением хлорида серебра в 1М растворе KCl с плотностью тока 5мА/см<sup>2</sup> в течение 30 с. Вспомогательный и рабочий электроды получены методом электрохимического осаждения меди и висмута.

В экспериментах в качестве фонового электролита выступал ацетатный буфер (0,2 М, рН=5,5). Потенциал предконцентрирования составлял -0,8 В, время предконцентрирования — 5 мин, скорость сканирования — 50 мВ/с.

На рис. 3 и 4 представлены кривые инверсионной вольтамперометрии, полученные на сенсорах с медным и висмутовым рабочими электродами.

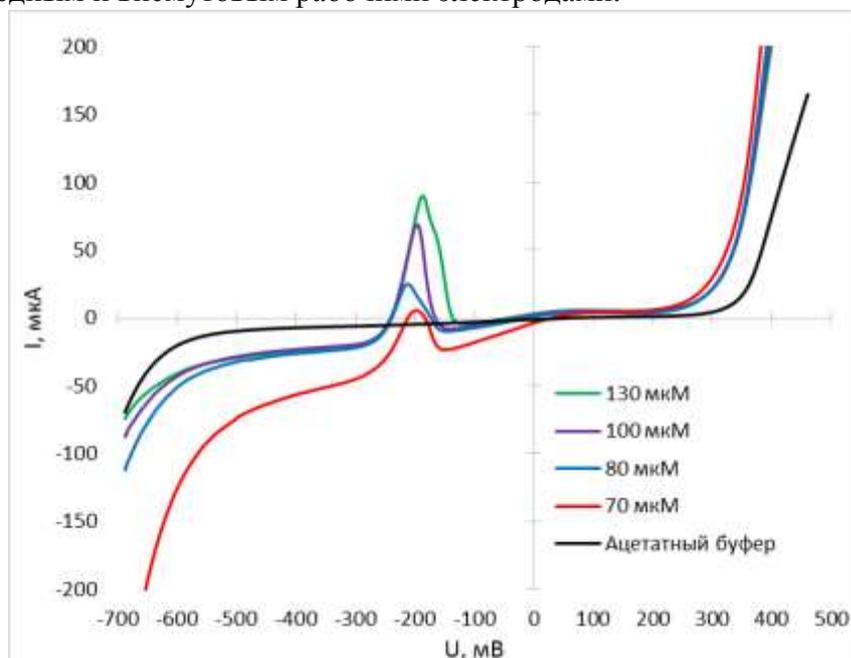


Рис. 3. Вольтамперные кривые ИВА при разных концентрациях Pb с использованием медных РЭ.

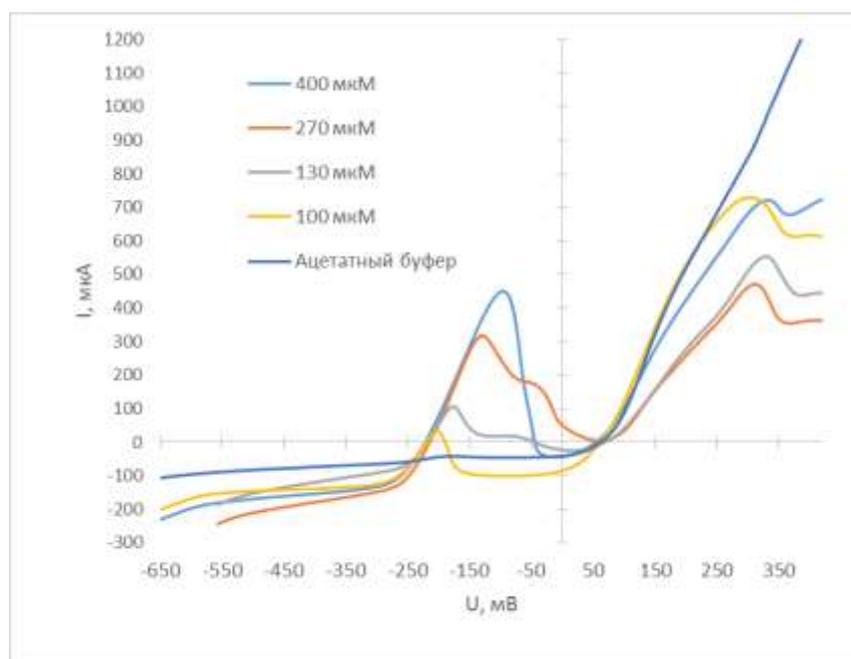


Рис.4. Вольтамперные кривые ИВА электродах при разных концентрациях Pb с использованием висмутовых РЭ.

Из зависимости предельных токов от концентраций свинца (рис. 3) видно, что разработанный сенсор на основе меди пригоден для экспресс-диагностики свинца с концентрацией 70 мкМ. Исходя из предельных соотношений сигнал/шум можно сделать предположение о том, что данная топология сенсора и протокол измерения позволяют достичь предела обнаружения в 7 мкМ при  $S/N = 3$ . Для повышения чувствительности метода требуется оптимизация топологии трехэлектродной системы сенсора.

Чувствительность сенсоров с медными и висмутовыми электродами одинаковой топологии является сопоставимой.

#### Список литературы

1. Ye Wang, Zhiguo Nie, Xinyi Li, Yang Zhao, Huan Wang, «Highly sensitive and selective electrochemical sensor based on porous graphitic carbon nitride/CoMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite toward heavy metal ions», *Sensors&Actuators: B. Chemical* 346 (2021) 130539
2. Bahar Mostafiz, Sara Arjomand Bigdeli, Kamran Banan, Hanif Afsharara, Dara Hatamabadi, Parastoo Mousavi, Chaudhery Mustansar Hussain, Rüstem Keçili, Fatemeh Ghorbani-Bidkorbbeh, «Molecularly imprinted polymer-carbon paste electrode (MIP-CPE)-based sensors for the sensitive detection of organic and inorganic environmental pollutants: A review», *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 32 (2021) e00144
3. Косых А.С. Магистерская диссертация «Разработка и исследование электрохимических сенсоров на основе углеродных нанотрубок для инверсионной вольтамперометрии», Екатеринбург, 2016
4. Кочеров В. И., Козицина А. Н., Иванова А. В., Митрофанова Т. С., Матерн А. И., «Инверсионная вольтамперометрия», УрФУ, Екатеринбург, 2016

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ЭКСПРЕСС-МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК

И.О. ТЕСТОВ, В.И. КРОХМАНСКИЙ, Н.А. ИВАНОВ

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

**Аннотация.** В настоящей работе рассмотрена возможность использования коэффициента пропускания света для определения толщины оптически прозрачной пленки, а также рассчитана относительная погрешность измерения ее толщины при использовании предлагаемого метода.

**Ключевые слова:** коэффициент пропускания, спектрофотометр, погрешность измерений.

Проектирование и создание различных электротехнических устройств, работающих в условиях воздействия на них электромагнитного поля, приводит к необходимости использования материалов с известными свойствами. Одно из таких свойств — толщина пленок и покрытий. Определение толщины пленок с малой относительной погрешностью измерений представляет достаточно трудоемкую задачу. Большинство существующих методов измерения настолько малых толщин являются длительными, дорогостоящими и разрушающими само покрытие.

**Целью данной работы** является разработка и проверка работоспособности, метода контроля толщины покрытий.

Для проведения исследований был разработан специальный держатель, закрепляющийся в спектрофотометре таким образом, что измеряемый образец располагается прямо перпендикулярно проходящему лучу света (см. рис. 1 и рис. 2). Конструкция держателя позволяет изменять горизонтальное и вертикальное положение образца, что позволяет измерять коэффициент прохождения света в разных точках на поверхности образца.



*Рис. 1. Держатель с установленным в него образцом.*



Рис. 2. Спектрофотометр DR 6000 с держателем внутри камеры для измерений.

Материалами для проведения измерений и проверки работоспособности метода были выбраны тонкие пленки никеля, нанесенные на стеклянную подложку. Для применения метода была построена зависимость коэффициента пропускания света от толщины покрытия (рис. 3). Толщина покрытия определялась профилометрическим методом, основанного на измерении уступа, образованного краем пленки с подложкой, с помощью микроскопа [1].

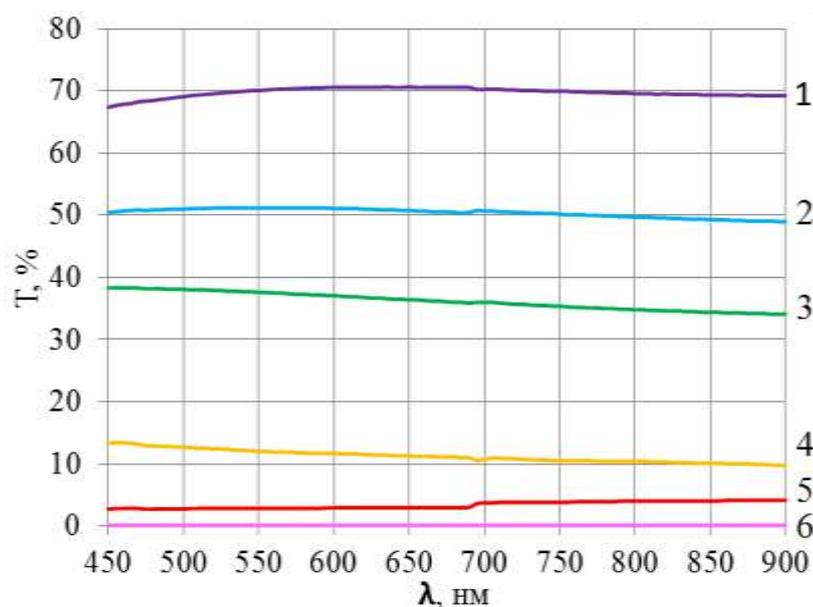


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания света в диапазоне длин волн от 450 до 900 нм для образцов пленок никеля, различной толщины: 1 – 4 нм, 2 – 10 нм, 3 – 16 нм, 4 – 35 нм, 5 – 70 нм, 6 – 110 нм.

На основании полученных результатов для различных длин волн (в диапазоне от 450 до 900 нм с шагом 50 нм) были построены зависимости коэффициента пропускания от толщины покрытия (пример приведен на рисунке 4).

Для всех выбранных длин волн вид зависимостей практически соответствует экспоненциальным.

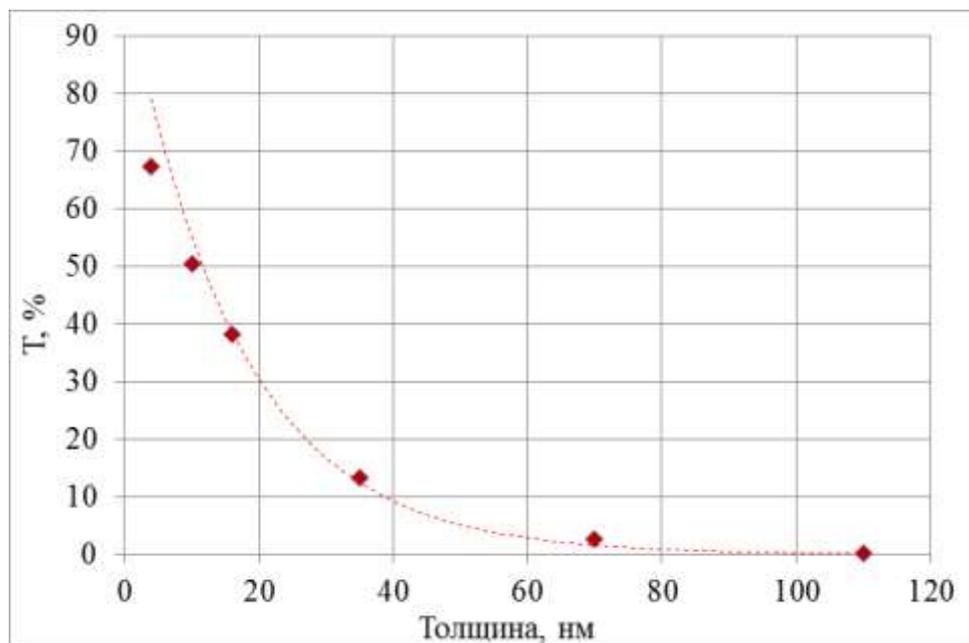


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания света от толщины для образцов пленок никеля, на длине волны 450 нм.

Для расчета относительной погрешности толщины покрытий было исследовано 9 образцов, для каждого из которых, используя все калибровочные кривые, графическим способом определялась толщина покрытия (табл. 1).

Таблица 1

#### Погрешность косвенных измерений толщины

Образец	Толщина, нм	Погрешность, нм	Погрешность, %
1	9,72	0,35	3,6
2	20,33	0,69	3,4
3	36,53	0,79	2,1
4	52,45	0,77	1,5
5	78,65	0,53	0,7
6	104,53	0,85	0,8
7	27,74	0,82	2,9
8	42,08	0,27	0,6
9	100,94	0,75	0,7

Погрешность косвенных измерений, рассчитанная по стандартной методике, составляла не более чем 3,6% [2]. Следует отметить снижение величины погрешности в процентах с ростом толщины покрытия.

**Заключение.**

После построения калибровочных кривых предложенный метод позволяет проводить неразрушающий экспресс контроль толщины оптически прозрачных пленок.

### Список литературы

1. ГОСТ 9.302-188, 1990. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. М.: Издательство стандартов, 1990.
2. ГОСТ 8.401-80, 1981. Межгосударственный стандарт. Классы точности средств измерений. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2010.

## ОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ НА ОСНОВЕ КАРОТИНОИДОВ

В.А. Фролова, Т. М. Зими́на, К.А. Пров

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

**Аннотация.** Рассмотрены перспективы применения биогенных материалов для создания полевых транзисторов, O-FET. Проведено выделение каротиноидов, разработана методика их нанесения на подложку, содержащую встречно-штыревые преобразователи, исследованы вольтамперные характеристики микроустройств. Предложен эскиз биосенсора на основе полевого транзистора, содержащего пленку каротиноидов в качестве полупроводникового сенсора.

**Ключевые слова:** органический полевой транзистор O-FET, каротиноиды, биосенсоры.

В наше время возрастает интерес к созданию электронных устройств на основе органических биогенных материалов [1]. Ведь их не сложно добыть, не сложно обработать, они не дорогие, не загрязняют окружающую среду, биodeградируемы, а также в природе имеется большое их разнообразие [2].

Исходя из всех этих плюсов, для эксперимента выбраны каротиноиды. Чаще всего они имеют окрас от жёлтого до красного. Их можно найти во многих природных материалах, в таких как морковь, тыква, шпинат, томаты и многие другие. Сравнительные характеристики каротиноидов приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

### Содержание каротиноидов в растительных продуктах

Наименование	Содержание основных каротиноидов в 100 г материала			
	Лютеин	Ликопин	β-каротин	Сумма каротиноидов
Морковь	0,2 — 0,4	0	5,1 — 5,6	7,4 — 8
Сладкий перец	0,3 — 0,5	0	1,5	3,2 — 3,7
Томаты	0,1	4,1	0,8	3,1 — 5,0
Тыква	0	0	1,3 — 3,9	2,1 — 6,5
Шпинат	12 — 15	0	7,3	19,3

В основном, каркас каротиноидов может быть построен восемью изопреновыми (C<sub>5</sub>) фрагментами и может быть графически представлен в виде линейной центральной части и двух крайних структурных фрагментов:

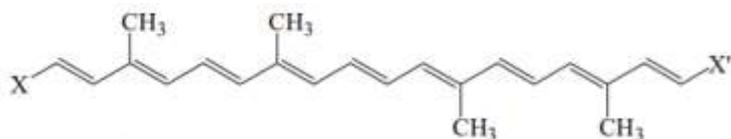


Рис. 1. Структурная формула каротиноидов.

Наибольшей биологической активностью обладает  $\beta$ -каротин (рис. 2).

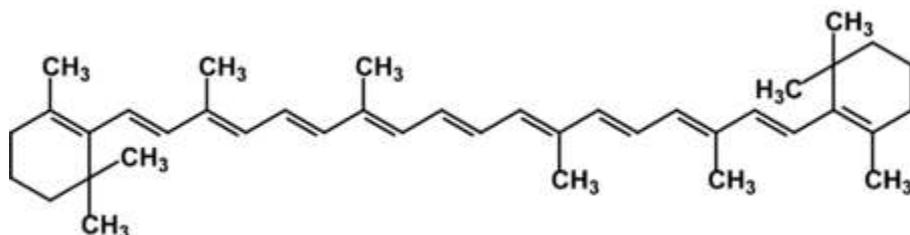


Рис. 2. Химическая формула  $\beta$ -каротина.

Каротиноиды хорошо растворимы в маслах и жирах. Кроме того, они растворимы в органических растворителях, таких как кетон, диэтиловый эфир, метанол и хлороформ, изопропанол.

Из-за наличия двойных связей в их химической структуре каротиноиды очень чувствительны к определенным элементам окружающей среды, таким как: кислород, пероксиды, металлы, кислоты, свет и тепло. Поэтому выделить их с высокой степенью чистоты как необходимо в нашем эксперименте было не так просто.

Напомним, что такое органические полевые транзисторы.

OFET представляет собой электронное устройство, состоящее из электродов (сток, исток и затвор), подзатворного диэлектрика и органического полупроводника. Они были разработаны для реализации дешёвых электронных продуктов большой площади и биоразлагаемой электроники, могут иметь различную структуру и геометрию. Основное технологическое преимущество органических транзисторов заключается в том, что формирование слоев возможно при комнатной температуре недорогими методами обработки раствора, что делает их производство очень выгодным.

На рис. 4 можно увидеть типовую схему органического полевого транзистора. На подложку нанесен тонкий слой затвора, поверх него слой диэлектрика. Далее идет слой полупроводника и на все слои нанесены сток и исток транзистора.

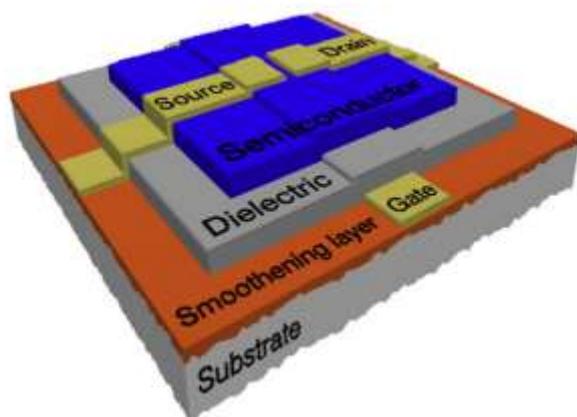


Рис. 3. Схематическое устройство транзистора.

В нашей работе мы создадим органический полевой транзистор, где в качестве полупроводникового материала будут использоваться каротиноиды, которые были выделены методом экстракции.

С моим коллегой мы получили значения электрических свойств транзистора, представили их в таблице.

Таблица 2

**Зависимость тока стока от напряжения на затворе**

$U_3, В$	0	1	2	3	4	5	6
$I_c, мкА$	0	7	15	20	22	24	25

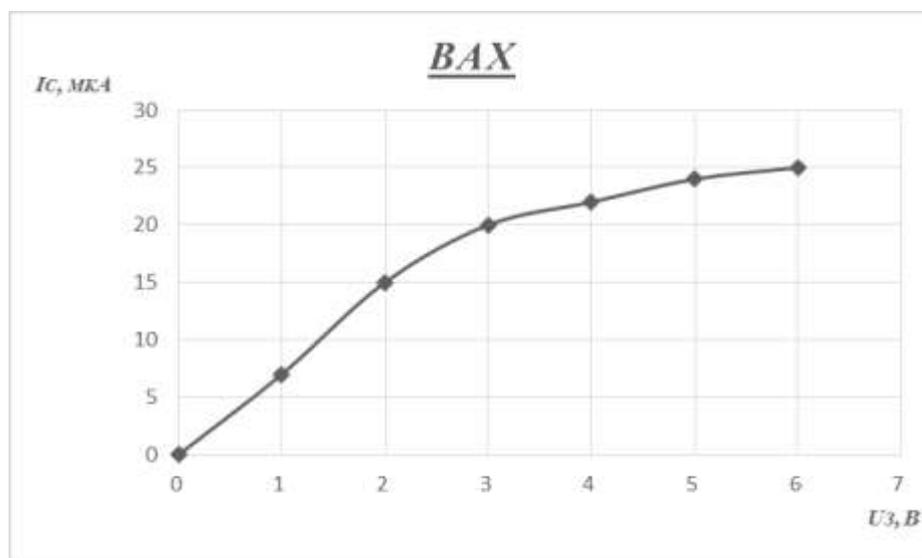


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика.

$U_p$  (напряжение питания) = 10В

$I_y$  (ток утечки) = 40мкА

$U_3$  — напряжение на затворе

$I_c$  — ток стока

**Выводы.**

Полупроводниковые материалы из каротиноидов будут иметь большой спрос и популярность, ведь они очень выгодны, достаточно легки в работе, органичны и изучать их интересно и занимательно.

**Список литературы**

1. Zimina, T.M., Luchinin, V.V., Sitkov, N.O., ...Lemoserskii, V.E., Orekhov, Y.D. Hybrid-integrated lab-on-a-chip for total express-microbiological analysis: State of the art and the nearest perspectives. AIP Conference Proceedings, 2019, 2140, 020084
2. Kymissis, I. (2008). Organic semiconductor materials for OFETs. Organic Field Effect Transistors, 1–11.
3. Peroulis, D., Waghmare, P. R., Mitra, S. K., Manakasettharn, S., Taylor, J. A., Krupenkin, T. N. Wannemacher, R. (2012). Conduction Mechanisms in Organic Semiconductors. Encyclopedia of Nanotechnology, 493–500.
4. Бараш, Л.И. Органические транзисторы — базовые принципы и устройство / Л.И. Бараш // Наука и технологии. — 2008. — № 15. -С.632.

5. Pachauri, V., & Ingebrandt, S. (2016). Biologically sensitive field-effect transistors: from ISFETs to Nano-FETs. *Essays In Biochemistry*, 60(1), 81–90.
6. Lucas, B., El Amrani, A., Moliton, A., Skaiky, A., El Hajj, A., & Aldissi, M. (2012). Charge transport properties in pentacene films: Evaluation of carrier mobility by different techniques. *Solid-State Electronics*, 69, 99—103.
7. Патент № 2304163 Российская Федерация. МПК. С11В 1/10 (2006.01) Способ экстракции каротиноидов / Зелха М., Седлов Т. 2005. — 11 с.

## СПОСОБЫ ИНКОРПОРИРОВАНИЯ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СЕНСОРИКИ И БИОМЕДИЦИНЫ

К. ХАЛУГАРОВА

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

Аннотация. В данной работе проводится литературный обзор по методам инкорпорирования пористого кремния для применения в областях сенсорики и биомедицины.

**Ключевые слова:** пористые материалы, пористый кремний, инкорпорирование.

### Введение

Универсальность пористого кремния (por-Si), обусловленная сорбционной способностью, большой площадью поверхности, объемом пор и концентрации, высокой стабильностью возможностью формирования множества новых структур, возможностью химической модификации и присущей биосовместимостью, привела к тому, что его достаточно несложно адаптировать для многочисленных биомедицинских применений. С помощью методов модификации многочисленные виды от антител до полимеров могут быть интегрированы в структуры por-Si. Эта адаптивность позволила получить материалы с увеличенным периодом полураспада как *in vitro*, так и *in vivo* и позволила разработать как платформы для целевого обнаружения, так и локальную доставку терапевтических нагрузок. В результате модифицированный por-Si был широко применен в ряде биомедицинских приложений, включая молекулярное обнаружение, доставку лекарств, терапию рака, визуализацию и тканевую инженерию.

Кремний является компонентом всех клеток человеческого организма, его среднесуточное потребление составляет порядка 20–50 мг. В зависимости от степени пористости, кремниевые частицы могут быть биологически активны, биоинертны или биоразлагаемы.

Биоинертные материалы не разлагаются в организме человека, но они и не являются вредными и легко выводятся из организма. Мезопористый кремний в организме человека разрушается до мономерных кремниевых кислот.

Специфический состав функциональных групп, их общие кислотнo-щелочные свойства, а также зарядовое состояние поверхности por-Si являются важными факторами, которые следует учитывать при выборе условий получения пористого кремния; они существенно влияют на механизм взаимодействия между поверхностью носителя por-Si и привитыми терапевтическими агентами или другими веществами.

Благодаря различным методам получения пористого кремния с вариативными свойствами поверхности, пористый кремний позволяет крепление множества видов активных молекул на его поверхности [1, 2].

Способы введения лекарственных форм на основе пористого кремния: пероральный путь введения, внутривенный путь введения, внутриглазное введение, внутриопухоловое введение, включая брахитерапию.

Инкorporирование является процессом введения частиц одного вещества в матрицу другого. Наличие пористой структуры у кремния дает возможность внедрять в нее активные вещества терапевтического действия для дальнейшей адресной доставки, а также модификации поверхности пористого кремния.

Например, в работе [3] широко рассматриваются наиболее распространенные методы функционализации поверхности пористого кремния. Химический состав поверхности  $\text{por-Si}$  может быть функционализирован с помощью ряда методов химической модификации, включая окисление, нитридизацию, силанизацию, гидросилилирование, карбонизацию, гидрокарбонизацию и электрографтинг.

### **Примеры способов инкorporирования**

#### *Адресная доставка лекарств*

Попытки дополнительно улучшить высвобождение лекарственного средства из  $\text{por-Si}$  заключались в инкorporировании полимеров. Интеграция двух систем может быть достигнута путем ограничения (англ. capping), покрытия, поддержки и инкапсуляции полимера. Эти введенные полимерные слои затем могут действовать как механизм контроля высвобождения. Однако их эффективность зависит от наличия подходящей системы веществ-растворителей интересующего лекарства, смачивания слоя  $\text{por-Si}$  и набухания слоя полимера.

Так, например, для контроля скорости высвобождения лекарства из загруженных субстратов  $\text{por-Si}$  повторяющееся покрытие слоем поликапролактона различной толщины инкапсулирует насыщенные красителем субстраты  $\text{por-Si}$  и замедляет наблюдаемую скорость высвобождения. Поликапролактон наносился на поверхность пористого кремния путем нагрева полимера.

Пленка  $\text{por-Si}$ , покрытая слоем из гидрогеля хитозана, использовалась для контроля высвобождения инсулина в течение более 100 минут, избегая типичного выброса вещества, наблюдаемого из непокрытого  $\text{por-Si}$ . Капельное покрытие использовалось для размещения полимерной пленки «гейткипера» (англ. gatekeeper) на кремниевой пористой поверхности. На образец наносили каплю хитозанового раствора и выпаривали в растворителе уксусной кислоты при комнатной температуре в течение 16 часов. В это время происходит конденсация силанольных групп и скрепления хитозановой сетки. Окисление пористой пленки Si является важным шагом в этом процессе. В этой работе авторы стремились использовать большую часть пористой пленки в качестве резервуара для лекарственного средства, покрывая только верхнюю часть пористой пленки гидрогелем, оставляя большую часть пористой системы пустой [4].

Встраивание микрочастиц  $\text{por-Si}$  в полимерные монолиты также может позволить создавать композитные материалы. В работе [5] были приготовлены наполненные лекарством полимерные блоки различного размера и формы, и затем микрочастицы  $\text{por-Si}$  были прикреплены к внешней поверхности посредством локального плавления.

Одним из способов получения флуоресцентных наночастиц диоксида кремния [6] заключается в добавлении красителя после того, как матрица из диоксида кремния была получена, и последующему инкorporированию красителя в органическую матрицу путем диффузии.

Последующая обработка может осуществляться либо путем влажной пропитки, при которой краситель физически абсорбируется на предварительно синтезированном пористом кремнии, либо как в методе постпрививания, чтобы химически связать краситель с матрицей на втором этапе.

В работе [7] авторы получили и исследовали нанокompозит на основе инкапсуляции наночастиц термически гидрокарбонизированного пористого кремния (THCPSi) твердыми липидными наночастицами. Загрузка вещества в частицы por-Si за счет электростатических взаимодействий и/или физической адсорбции достигается легко, но из-за свободно доступных пор por-Si она может быть нарушена метаболитами/ионами, присутствующими в жидкостях организма, что приводит к преждевременному высвобождению вещества и даже его инактивации. Авторами работы были предприняты попытки инкорпорировать вещества путем ковалентного присоединения и удерживать их путем окисления внутри наноструктуры por-Si, чтобы замедлить скорость высвобождения загруженных агентов. Оба этих метода включают химические реакции, которые могут привести к инактивации или деградации загружаемых веществ.

Пористый кремний также очень эффективен в доставке противовирусных препаратов к инфицированным клеткам. Авторы работы [8] загрузили стрептоцид (saliphenylhalamide) в наночастицы термически гидрокарбонизированного por-Si (THCPSi) с использованием дихлорметана и этанола. Стрептоцид загружали в наночастицы THCPSi, растворяя препарат в дихлорметане и затем добавляя к раствору чистый этанол. Раствор инкубировали при 40°C и давлении 200 мБар в течение 1 часа. Делалось это для концентрирования стрептоцида в растворе для загрузки и в то же время для предотвращения кристаллизации лекарства, используя как низкое давление, так и температуру. Полученный раствор инкубировали с наночастицами THCPSi в течение 1 ч при перемешивании для загрузки вещества в пористую матрицу THCPSi. Затем наночастицы центрифугировали в течение 2 минут, а супернатант убирали. Для определения степени загрузки лекарственным средством, фракцию наночастиц THCPSi диспергировали в этаноле в течение 2 часов, а затем центрифугировали. Затем частицы повторно инкубировали с этанолом в течение следующих 24 и 48 часов, чтобы количественно определить остаточный стрептоцид в наночастицах THCPSi. Степень загрузки стрептоцида в наночастицах THCPSi определялась массовым соотношением (мкг) соединения на 100 мкг наночастиц THCPSi.

Авторы работы [9] использовали частицы пористого кремния, загруженные лекарственным препаратом (гентамицин сульфатом) для его доставки ко внутреннему уху. Осаждение гентамицина на поверхности частиц проводили методом импрегнации. К объему дисперсии частиц пористого кремния в физиологическом растворе добавляли раствор гентамицина сульфата. Затем проба подвергалась обработке ультразвуком в течение 15 минут.

### **Визуализация in vivo**

Учеными разработаны двойные методы визуализации с использованием комбинации флуоресцентных и магнитных свойств. Авторы работы [10] достигли этого путем загрузки активированных бором микрочастиц por-Si суперпарамагнитными наночастицами оксида железа, которые были заблокированы в порах в результате длительного термического окисления. Однако поры не закрывались полностью, поэтому впоследствии можно было загрузить небольшое количество лекарственного средства. В этом исследовании магнитные свойства суперпарамагнитных наночастиц оксида железа позволяли нацеливаться на

локальный центр, в то время как флуоресценция одновременно использовалась для отслеживания por-Si. Двойные магнитные и люминесцентные наночастицы por-Si также включали инкорпорирование наночастиц кобальта в люминесцентный por-Si посредством электроинfiltrации [11]. Здесь было показано, что частицы обладают низкой цитотоксичностью и интернализуются мезенхимальными стволовыми клетками человека в течение 4 часов. Этот метод с дальнейшей настройкой и разработкой частиц можно использовать для нацеливания на органеллы или визуализации глубоких тканей.

### **Лечение раковых опухолей**

Фотодинамическая терапия обычно используется для выработки цитотоксического синглетного кислорода и активных форм кислорода (АФК) из фотосенсибилизаторов [12]. Двухфотонная инициация была использована для генерации цитотоксических видов из модифицированных порфирином наночастиц por-Si, чтобы вызвать гибель клеток рака груди человека. В исследовании гибель клеток увеличивалась до 75%, когда некоторые доли, нацеленные на маннозу, также были инкорпорированы в ковалентно связанные порфириновые наночастицы por-Si. Композиции por-Si-порфирин и por-Si-манноза получали путем ковалентного связывания порфирина и маннозы (фенилскварат маннозы) с наночастицами por-Si-NH<sub>2</sub>. Порфирин был присоединен к свободным аминам на por-Si-NH<sub>2</sub> через изотиоцианатную группу, присоединенную к порфирину.

Брахитерапия является одним из методов лечения раковых опухолей, основанный на излучении, исходящем из области, близкой к опухоли или внутри нее. BrachySil™ — это брахитерапевтическое лечение на основе пористого кремния, при котором радиоактивный изотоп <sup>32</sup>P, инкорпорированный в por-Si, вводится внутриопухолевой инъекцией, а высокие дозы излучения ограничиваются локальным участком, поскольку β-излучение проникает только в 8 мм ткани [13]. Фосфор-32 — это активное имплантируемое (радиологическое) устройство, содержащее кремний высокой чистоты (99,999%), легированный фосфором, который при облучении образует фосфор-32. Кремний и фосфор производятся методом плавления в печи, а затем распыляются водой на частицы микронного размера на месте. Эти частицы затем классифицируются по размеру, чтобы получить частицы с D50 (50-й перцентиль распределения частиц по размерам по диаметру) 30 микрон.

### **Заключение**

По изученным литературным источникам было выяснено, что существует множество методов инкорпорирования наночастиц в пористые матрицы, как на поверхности, так и внутри пористой системы.

Современные методы инкорпорирования различных химических функциональных групп в пористые материалы, такие как загрузка металлических наночастиц и иммобилизация химических фрагментов путем трансплантации, затруднены в исполнении из-за возникающих ограничений, таких как частичное блокирование пор, гетерогенное распределение на носителе и выщелачивание при различных условиях реакции.

Свойства пористого кремния, приобретаемые выбором исходного материала и технологических условий получения, выделяют его в особый класс наноматериалов с возможностью произвольной регуляции оптических, электрофизических, каталитических, химических параметров. Выбор типа и уровня легирования монокристаллического кремния обеспечивает возможность получать поверхность с различным химическим составом и электронными свойствами. От особенностей технологии получения также будет зависеть и состав адсорбционных центров на поверхности пористого кремния. Все эти особенности

необходимо учитывать при получении композиционных материалов на основе пористого кремния.

### Список литературы

1. Полковникова, Ю. А. «Использование пористого кремния в качестве перспективного носителя лекарственных веществ.» Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация 4 (2017): 124-129.
2. Spivak, Y. M., Mjakin, S. V., Moshnikov, V. A., Panov, M. F., Belorus, A. O., & Bobkov, A. A. (2016). Surface Functionality Features of Porous Silicon Prepared and Treated in Different Conditions. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1–8.
3. McInnes, Steven JP, and Rachel D. Lowe. «Biomedical uses of porous silicon.» *Electrochemically engineered nanoporous materials*. Springer, Cham, 2015. 117-162.
4. Wu, Jianmin, and Michael J. Sailor. «Chitosan hydrogel-capped porous SiO<sub>2</sub> as a pH responsive nano-valve for triggered release of insulin.» *Advanced functional materials* 19.5 (2009): 733-741.].
5. Mukherjee, Priyabrata, et al. «Biorelevant mesoporous silicon/polymer composites: directed assembly, disassembly, and controlled release.» *Biomedical Microdevices* 8.1 (2006): 9-15.
6. Liu, Q., DeShong, P., & Zachariah, M. R. (2012). One-step synthesis of dye-incorporated porous silica particles. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(7).
7. Liu, D., Mäkilä, E., Zhang, H., Herranz, B., Kaasalainen, M., Kinnari, P., ... Santos, H. A. (2012). Nanostructured Porous Silicon-Solid Lipid Nanocomposite: Towards Enhanced Cytocompatibility and Stability, Reduced Cellular Association, and Prolonged Drug Release. *Advanced*
8. Bimbo, L. M., Denisova, O. V., Mäkilä, E., Kaasalainen, M., De Brabander, J. K., Hirvonen, J., ... Santos, H. A. (2013). Inhibition of Influenza A Virus Infection in Vitro by Saliphenylhalamide-Loaded Porous Silicon Nanoparticles. *ACS Nano*, 7(8), 6884–6893.
9. Спивак Ю. М. и др. Пористый кремний как наноматериал для дисперсных транспортных систем направленной лекарственной доставки ко внутреннему уху //Журнал технической физики. — 2018. — Т. 88. — №. 9. — С. 1394
10. Gu, Luo, et al. «Magnetic luminescent porous silicon microparticles for localized delivery of molecular drug payloads.» *Small* 6.22 (2010): 2546-2552.
11. Munoz-Noval, Alvaro, et al. «Hybrid luminescent/magnetic nanostructured porous silicon particles for biomedical applications.» *Journal of biomedical optics* 16.2 (2011): 025002.
12. Secret, E., Maynadier, M., Gallud, A., Chaix, A., Bouffard, E., Gary-Bobo, M., ... Cunin, F. (2014). Two-Photon Excitation of Porphyrin-Functionalized Porous Silicon Nanoparticles for Photodynamic Therapy. *Advanced Materials*, 26(45), 7643–7648.
13. Goh, Anthony Soon-Whatt, et al. «A novel approach to brachytherapy in hepatocellular carcinoma using a phosphorous<sup>32</sup> (32P) brachytherapy delivery device—a first-in-man study.» *International Journal of Radiation Oncology\* Biology\* Physics* 67.3 (2007): 786-792.

## УЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ СПЕКТРОВ

Е.Д. ХОЛОПОВА

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

**Аннотация.** В работе рассмотрены зависимости разрешения и эффективности различных детекторов рентгеновского излучения от энергии регистрируемых квантов. Показаны результаты моделирования вторичных спектров и спектров рассеянного излучения, возникающие при облучении объекта с учетом всех характеристик регистрирующего тракта.

**Ключевые слова:** рентгенофлуоресцентный анализ; разрешение детектора; спектральная чувствительность детектора; эффективность детектора.

### Введение

В настоящее время метод рентгенофлуоресцентного анализа занимает одно из ведущих мест по широте применения при решении разнообразных задач. Рентгенофлуоресцентные энергодисперсионные и кристалл-дифракционные спектрометры позволяют с высокой точностью и за минимальное время качественно и количественно определять элементный состав многокомпонентных образцов в широком диапазоне концентраций.

В последнее время все большее внимание уделяется совершенствованию энергодисперсионных приборов, обладающих высокой светосилой рентгенооптических схем, малой чувствительностью к изменениям температуры окружающей среды в широких пределах, возможностью анализа одновременно всех элементов в образце. В связи с этим **актуальной задачей** является повышение аналитических характеристик энергодисперсионных анализаторов.

Однако при разработке аппаратуры и определении режимов ее эксплуатации экспериментальные исследования все больше замещаются компьютерным моделированием, которое позволяет значительно ускорить процесс разработки аппаратуры и существенно его удешевить.

Таким образом, **целью** данной работы является разработка программного комплекса моделирования вторичных спектров и спектров рассеянного излучения, возникающие при облучении исследуемого объекта с учетом всех характеристик регистрирующего тракта.

**Основная задача** исследования — анализ влияния характеристик детектора рентгеновского излучения на вторичный спектр.

**Научная новизна** работы заключается в том, что создано программное обеспечение, моделирующее процессы возбуждения первичного излучения рентгеновской трубки, возбуждения рентгеновского излучения в многокомпонентных образцах, условий регистрации вторичного излучения, которые позволяют использовать его как для разработки новых энергодисперсионных приборов, так и проводить отработку методик при решении конкретных промышленных задач на серийных приборах.

#### **Учет характеристик детектора при моделировании вторичных спектров рентгеновского излучения.**

Математические модели как спектра первичного излучения рентгеновской трубки, так и сложного спектра рентгеновского излучения, включающего вторичное характеристическое излучение от элементов анализируемого образца и рассеянное излучение рентгеновской трубки, включающее тормозную и характеристическую составляющие, рассмотрены в работах [1-3].

Представленный на рис. 1 смоделированный спектр ювелирного золотого сплава показывает, что линии характеристического излучения имеют природное уширение, обусловленное строением вещества и тепловыми явлениями, но оно мало, и в несколько раз меньше, чем влияние со стороны детектора.

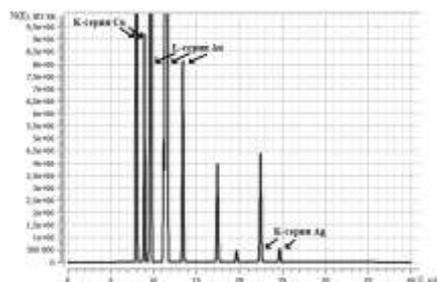


Рис. 1. Спектр ювелирного золотого сплава при напряжении 40 кВ и токе 200 мкА, а также алюминиевом фильтре толщиной 50 мкм.

Поскольку каждая линия характеристического излучения (будь то рассеянное первичное характеристическое излучение трубки или возбужденное в анализируемом образце характеристическое излучение элементов), как было упомянуто ранее, обладает собственным «уширением», то форма линии может быть описана по закону нормального распределения.

Разрешение традиционных детекторов рентгеновского излучения (газовых пропорциональных, электролюминесцентных и полупроводниковых) определяется процессами, происходящими при регистрации излучения — дрейфа электронов в газовом детекторе (с эффектами лавинного разряда), ослабления света, возникающего в кристалле сцинтилляционного детектора и так далее. При этом разрешение детектора зависит от энергии регистрируемых квантов и может быть представлено аналитической зависимостью (рис. 2) — например, если для  $K\alpha$ -линии железа с энергией 6.4 кэВ разрешение полупроводникового детектора будет составлять 130 эВ, то для  $K\alpha$ -линии серебра с энергией 22.1 кэВ — уже 250 эВ.

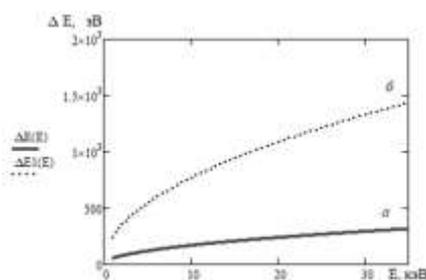


Рис. 2. Спектральная зависимость разрешения детекторов: (а) полупроводникового и (б) газового пропорционального.

«Размыть» линии первичного рассеянного и вторичного флуоресцентного характеристического излучения в этом случае достаточно просто, используя традиционное нормальное распределение, при этом среднеквадратичное отклонение определяется разрешением детектора на данной энергии:

$$dnorm(x, m_x, \sigma_x) = \left( \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \right) * \exp\left( -\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2} \right).$$

Однако, существенно большую сложность представляет собой размытие спектра рассеянного тормозного рентгеновского излучения, поскольку спектр может иметь не гладкую зависимость, а скачкообразную, например, за счет самопоглощения в мишени трубки, ослабления первичным и вторичным фильтрами, а также самопоглощения в анализируемой пробе (рис. 3).

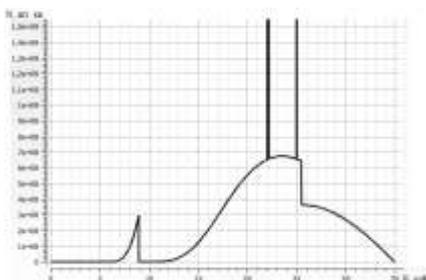


Рис. 3. Пример влияния коэффициентов фотопоглощения на спектр первичного излучения.

В данном случае необходимо использовать операцию свертки двух функций — спектрального распределения рассеянного тормозного излучения и спектрального распределения энергетического разрешения детектора:

$$I(X) = \int_1^{E_{\max}} I_r(E) dnorm(E, X, \Delta E(E)) dE$$

где  $E_{\max}$  — максимальная энергия в спектре,  $I_r(E)$  — исходная спектральная интенсивность,  $dnorm(E, X, \Delta E(E))$  — функция плотности распределения в каждой точке для данного среднего значения  $X$  и стандартного отклонения  $\Delta E(E)$ .

Данная операция достаточно сильно зависит от задаваемого разрешения детектора и шага, с которым осуществляется расчет итогового спектра (если вводимое разрешение детектора будет равно или меньше шага для расчета, то на спектре возникнет большое количество артефактов).

Другой фундаментальной характеристикой детектора является его эффективности, под которой обычно понимается отношение числа зарегистрированных квантов определенной энергии к числу квантов той же энергии, падающих на входное окно детектора, другими словами, доля квантов, вызывающих ионизацию атомов в чувствительном объеме детектора и зарегистрированных в основном пике амплитудного распределения.

Полная эффективность может быть выражена в виде произведения коэффициентов геометрической эффективности  $\epsilon_{\text{геом}}$ , эффективности поглощения  $\epsilon_{\text{погл}}$  и собственной эффективности  $\epsilon_{\text{собств}}$ .

Геометрическая эффективность  $\epsilon_{\text{геом}}$  представляет собой долю испущенных квантов, которые попадают в детектор и определяется выражением:

$$\epsilon_{\text{геом}} = \frac{S_{\text{дет}}}{4\pi r^2},$$

где  $S_{\text{дет}}$  — площадь поперечного сечения детектора,  $r$  — расстояние между исследуемым образцом и детектором. Этот коэффициент по существу не зависит от энергии кванта, а только лишь отражает закон обратных квадратов для скорости счета, как функции расстояния.

Излучение, сформировавшееся в результате взаимодействия первичного излучения с образцом, попадает в детектор рентгеновского излучения, в котором происходят те же самые процессы, что и в веществе исследуемого образца (фотопоглощение, когерентное и некогерентное рассеяние). Поэтому в первом приближении эффективность поглощения  $\epsilon_{\text{погл}}$  можно оценить, как:

$$\epsilon_{\text{погл}} = \exp\left(-\sum_i \rho_i \mu_i(E) d_i\right),$$

где  $\rho_i$  — плотность  $i$ -го промежуточного материала,  $\mu_i$  — массовый коэффициент поглощения  $i$ -го промежуточного материала,  $d_i$  — толщина  $i$ -го промежуточного материала.

Причем следует отметить, что суммирование проводится по всем типам промежуточных материалов (таких как корпус детектора, специальные поглотители и т.д.), которые поглощают часть входящего излучения перед тем, как оно провзаимодействует с детектором.

Собственная эффективность  $\epsilon_{\text{собств}}$  представляет собой вероятность того, что квант, который попадает в детектор, провзаимодействует и даст импульс в основной пик амплитудного распределения и описывается как:

$$\epsilon_{\text{собств}} = 1 - \exp(-\rho \mu(E) d),$$

где  $\rho$  — плотность чувствительного материала детектора,  $\mu$  — фотоэлектрический массовый коэффициент ослабления,  $d$  — толщина чувствительного материала детектора.

Таким образом эффективность поглощения описывает процесс поглощения излучения во входном окне, то есть излучение, которое не доходит до основного поглотителя детектора, а собственная эффективность описывает эффективность самого поглотителя.

### Заключение

Примером реализации учета характеристик детектора при моделировании вторичных спектров рентгеновского излучения могут служить представленные на рис. 4 спектры жаропрочной стали, состоящий из 70% железа, 18% никеля, 10% кобальта и 2% остальных примесей при регистрации на полупроводниковый и электролюминесцентный детекторы.

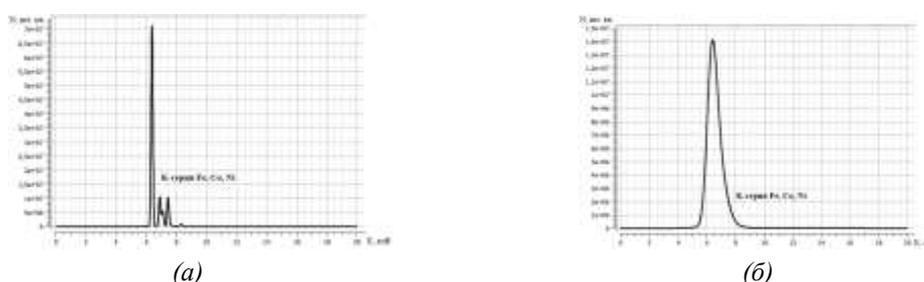


Рис. 5. Спектр жаропрочной стали на (а) полупроводниковый и (б) электролюминесцентный детекторы.

Разработанный программный комплекс дает возможность рассчитывать вторичные спектры и спектры рассеянного излучения, возникающие при облучении объекта с учетом всех характеристик регистрирующего тракта (такие параметры, как чувствительность детектора, эффективность и площадь входного окна учитывались ранее). Использование разработанного программного обеспечения позволяет определять оптимальные режимы работы спектрометра, оценивать точность, предел обнаружения и иные параметры при моделировании рентгеноспектрального анализа.

### Список литературы

1. Холопова Е.Д., Бессонов В.Б., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Лившиц А.О., Кунашик Е.С. Программа для моделирования спектров излучения «Спектрон». Свид. о регистр. прогр. для ЭВМ. № 2014618547.
2. Холопова Е.Д., Грязнов А.Ю., Староверов Н.Е., Александрова А.А., Чебыкин А.П., Бавкунова И.Ю. Программный комплекс для моделирования вторичных спектров рентгеновского излучения // VIII Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники. Программа и материалы конференции / СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 131-135
3. Грязнов А.Ю., Холопова Е.Д., Староверов Н.Е., Александрова А.А., Баранов И.М. Программный комплекс для моделирования вторичных спектров рентгеновского излучения (XRF-spectr). Свид. о регистр. прогр. для ЭВМ. № 2021680309.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА

ШАГИМУРАТОВА А.К.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Аннотация.** Магнитореологический эластомер — интеллектуальный материал, способный изменять свои реологические свойства под действием магнитного поля. **Объектом работы** является демпфер на основе многослойного магнитореологического эластомера. **Целью работы**

является исследование температуры нагрева магнитореологического демпфера и разработка системы охлаждения.

**Ключевые слова:** многослойный магнитореологическая эластомер, магнитореологический демпфер, виброизоляция, тепловой расчет, система охлаждения, тепловые трубки

Система вибрационной защиты является неотъемлемой частью современного оборудования. Под виброизоляцией, как одним из методов вибрационной защиты, понимается метод, заключающийся в уменьшении передачи вибрации от источника возбуждения защищаемому объекту при помощи устройств, помещаемых между ними [1].

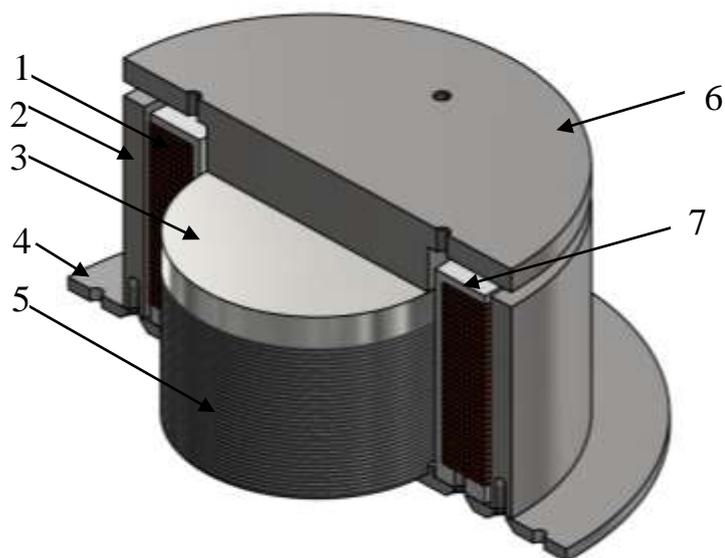
Одним из перспективных способов реализации активной виброизоляции является использование в системе виброизоляции «интеллектуального» материала магнитореологического эластомера (МРЭ). МРЭ представляет собой силиконовую матрицу, в которой диспергированы микрометровые частицы магнитомягкого материала.

Их механические свойства уже достаточно подробно изучены для нормальных условий: они способны изменять свои реологические характеристики (вязкость, упругость, пластичность, модуль сдвига) под действием внешнего магнитного поля. Благодаря этому МРЭ нашли широкое применение в различных демпфирующих и амортизирующих устройствах [2].

Объектом исследования в работе является устройство виброизоляции, демпфер на основе многослойного МРЭ [3]. Основными элементами демпфера являются магнитопровод 2, 3, 4, 6, катушка индуктивности 1,7 и магнитореологический эластомер 5. На катушку индуктивности подается управляющий ток, который пронизывает магнитопровод, ось симметрии катушки и многослойный МРЭ.

Постоянный магнит держит МР композит в напряженном состоянии. От направления течения тока через катушку зависит направление магнитного поля, а от его направления зависит будет притягивать постоянный магнит МР композит или наоборот отталкивать. От этого зависит перемещение крышки МР демпфера, на которой установлен объект.

Жесткость, упругость и др. характеристики МР композита изменяется в зависимости от внешнего магнитного, а также композит упруго деформируется. Этот магнитореологический эффект позволяет успешно применять МРЭ для защиты прецизионного оборудования от вибраций.



*Рис. 1. Демпфер на основе многослойного магнитореологического эластомера [3]*

*1 — катушка индуктивности, 2 — корпус, 3 — постоянный магнит, 4 — основание, 5 — МРЭ композит, 6 — крышка, 7 — каркас катушки.*

При продолжительной работе демпфера на высоких токах до 2А происходит перегрев управляющей электромагнитной катушки и самого демпфера. Из-за этого появляется риск расплавления лаковой изоляции медного провода обмотки катушки и выхода из строя демпфера из-за отказа функционирования.

Для решения задачи перегрева было предложено добавить в конструкцию систему охлаждения, которая должна быть статична, не иметь движущихся элементов, которые могут вызывать дополнительные вибрации.

Превышение температуры практически не должно отличаться от принятого допустимого 80 °С. Увеличение расчетного превышения температуры над допустимой на величину от 3 до 6 °С вполне допустимо, так как все допущения расчета обычно делаются в сторону ухудшения теплоотдачи и увеличения расчетного превышения температуры.

Необходимая отводимая тепловая мощность принята равной 100 Вт. Исходя из требований к системе охлаждения и расчетных данных для демпфера на основе многослойного МРЭ больше всего подходят тепловые трубки.

Для рассеивания тепла подобран радиатор по требуемому тепловому сопротивлению — чем меньше числовое значение сопротивления, тем больше эффективная поверхность отвода тепла радиатора. При этом стоит учитывать, что расчетное значение применимо исключительно к естественному теплообмену без вынужденного потока воздуха.

Необходимая расчетная площадь радиатора составила 420 см<sup>2</sup>. Количество ребер радиатора рассчитано в ПО Mathsoft Mathcad. Внешний диаметр радиатора разрабатывается равным диаметру нижнего фланца МР демпфера, чтобы избежать увеличения габаритных размеров конструкции.

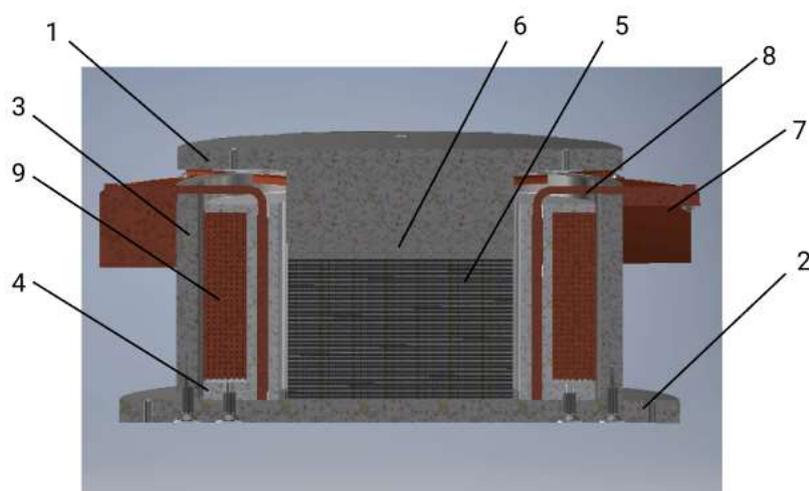


Рис. 2. Демпфер на основе многослойного магнитореологического эластомера с разработанной системой охлаждения.

1 — верхний фланец, 2 — нижний фланец, 3 — корпус, 4 — каркас катушки, 5 — МРЭ композит, 6 — магнит, 7 — радиатор, 8 — тепловая трубка, 9 — катушка.

Таким образом, исследование температуры нагрева катушки и проведенный тепловой расчет выделяемой из катушки мощности в 100 Вт показали необходимость использования системы охлаждения на основе 8 деформированных тепловых трубок диаметром 5 мм и радиатора наружным диаметром 210 мм с 24 ребрами.

### Список литературы

1. Санников А.А., Куцубина Н.В. Виброзащита машин и оборудования. Виброизоляция— Екатеринбург, 2009.— [https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/340/3/Sannikov\\_A.A.\\_Kucubina\\_N.V.pdf/](https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/340/3/Sannikov_A.A._Kucubina_N.V.pdf/) (дата обращения: 20.03.2022).
2. Интеллектуальные материалы[Электронный ресурс]. —URL: <https://helpiks.org/7-71026.html> (дата обращения 23.03.2022).
3. Bazinenkov, A.M., Makeev, I.V., Rotari, A.P., Ivanova, D.A. Estimation of the position error of the magnetorheological elastomers active vibration control platform for precision vacuum equipment (2018) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 387 (1), art. no. 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/387/1/012006.

## СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРОВСКИТ, СОДЕРЖАЩИХ КОЛЛОИДНЫЕ КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ

А.А. ШАРОВ, А.Э. ДЕГТЕРЕВ, И.А. ЛАМКИН

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

**Аннотация.** В работе были описаны основные методы получения тонких пленок кристаллической структуры перовскит, а также исследовано влияние коллоидных квантовых точек на их спектр фотолюминесценции.

**Ключевые слова:** перовскит, тонкая пленка, ККТ.

Одной из активно развивающейся отраслью науки является солнечная энергетика, у которой основным материалом для преобразования солнечной энергии в электрическую служит кремний. Однако, в последние годы кремний стоит у порога своих возможностей и ко всему прочему, сам материал непрямозонный, что сказывается в худшую сторону на разделении носителей заряда и сильно ограничивает его эффективность. В настоящее время идет активный поиск альтернативных материалов, которые могли бы стать заменой кремнию и к таким материалам относится перовскит.

До не давнего времени под термином «перовскит» понималась кристаллическая структура титаната кальция ( $\text{CaTiO}_3$ ), которая была названа в честь российского политика Льва Алексеевича Перовского. Но сейчас же каждый человек, который так или иначе связан с возобновляемой солнечной энергетикой под этим термином понимает структуру с формулой  $\text{ABX}_3$ , где А и В — это одновалентные и двухвалентные катионы, а X — одновалентный анион (рис.1) [1].

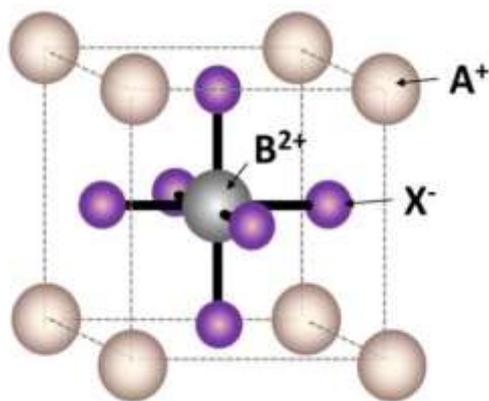


Рис. 1. Пример элементарной ячейки решетки перовскита [1].

Перовскит не добывают из недр земли, а получают его в лаборатории одноступенчатым или двухступенчатым методами [1].

Одноступенчатый метод (рис.2) представляет из себя использование сразу же готового «жидкого» перовскита (раствор веществ, входящих в формулу перовскита), который наносится на подложку центрифугированием. Перед термической обработкой (отжиг), присутствует промежуточная стадия в виде добавления анти-растворителя на тонкую пленку жидкого перовскита, что способствует удалению остатков растворителя и началу кристаллизации перовскита. И заключительной стадией для получения полноценной тонкой кристаллической пленки является отжиг.

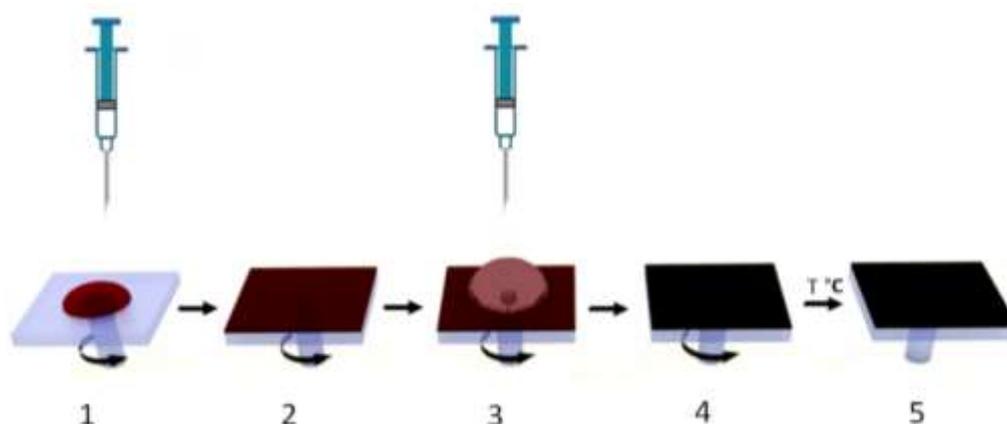


Рис. 2. Получение перовскита одноступенчатым методом.

1) нанесение на подложку жидкого перовскита; 2) однородное распределение слоя центрифугированием; 3) промежуточная стадия с добавлением анти-растворителя; 4) начало кристаллизации; 5) отжиг [1]

Двухступенчатый метод (рис.3) представляет из себя последовательное нанесение двух прекурсоров (растворов вещества, входящих в рецепт перовскита). Заключительной стадией является отжиг.

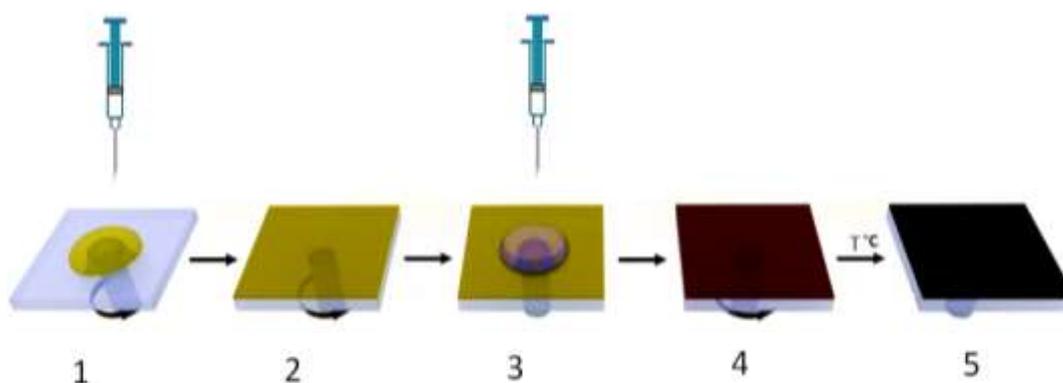


Рис. 3. Получение перовскита двухступенчатым методом.

1) нанесение на подложку первого прекурсора; 2) однородное распределение слоя центрифугированием; 3) нанесение на подложку второго прекурсора; 4) однородное распределение слоя центрифугированием с началом кристаллизации 5) отжиг [1]

В процессе работы исследовалось влияние коллоидных квантовых точек (ККТ) на полученную тонкую пленку кристаллической структуры перовскит. ККТ — это полупроводниковые нанокристаллы с размером около 2-10 нанометров, из-за чего в них проявляются квантовые размерные эффекты (носители заряда становятся ограничены по трем координатам). При изменении размера квантовой точки, изменяется расстояние между энергетическими уровнями, что позволяет изменять спектр фотолуминесценции [2].

Тонкую пленку кристаллической структуры перовскита  $\text{MAPbI}_3$  и  $\text{Cs}_{0,05}(\text{FA}_x\text{MA}_{1-x})_{0,95}\text{PbI}_y\text{Br}_{3-y}$  с коллоидными квантовыми точками получали одноступенчатым методом [3], где в промежуточной стадии добавляли ККТ с анти-растворителем.

На рисунке 4 представлен результат влияния коллоидных квантовых точек CdSe в оболочке ZnS с пиком фотолюминесценции на длине волны 680 нм на кристаллическую структуру перовскита  $\text{MAPbI}_3$ . Видно, как за счет ККТ интенсивность излучения фотолюминесценции пленки перовскита стала выше и шире.

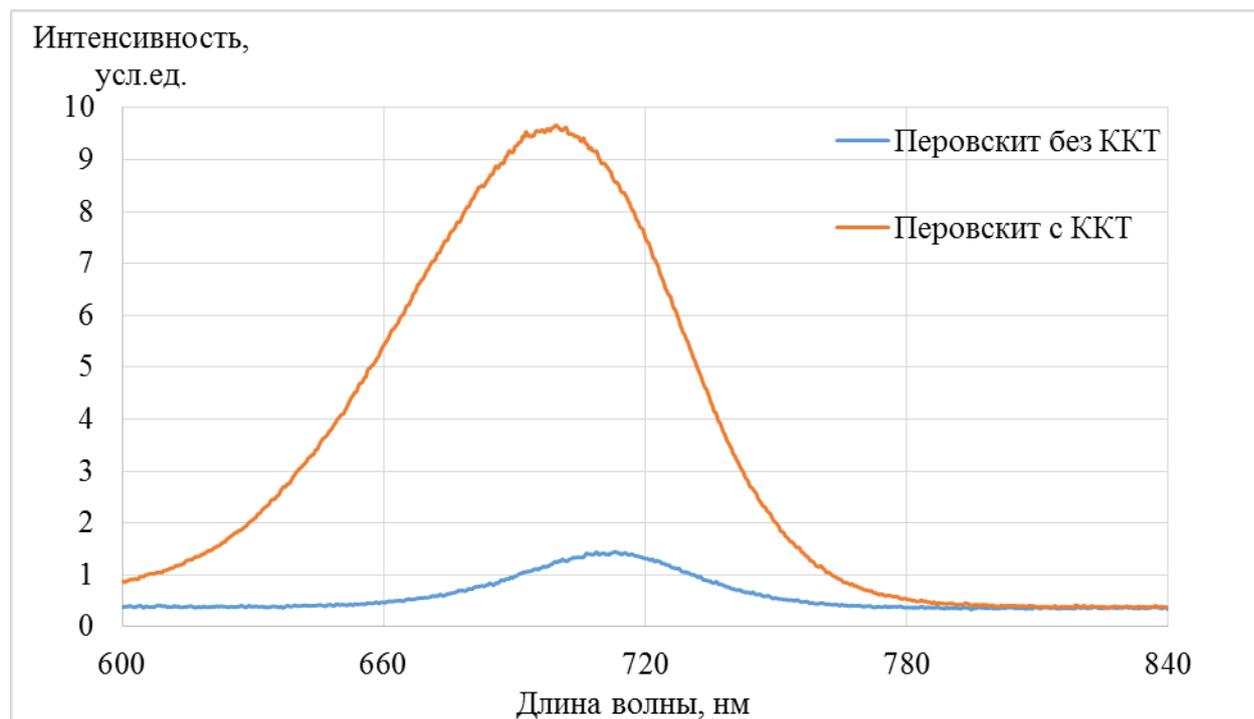


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции пленок перовскита  $\text{MAPbI}_3$  с коллоидными квантовыми точками  $\text{CdSe/ZnS}$  680 и без.

Еще одним примером улучшения оптического свойства тонкой пленки кристаллической структуры перовскита  $\text{Cs}_{0,05}(\text{FA}_x\text{MA}_{1-x})_{0,95}\text{PbI}_y\text{Br}_{3-y}$  за счет ККТ является рисунок 5, где квантовые точки CdSe в оболочке ZnS имеют пик фотолюминесценции на длине волны 600 нм, а пик фотолюминесценции перовскита находится на длине волны 680 нм. Также заметно смещение пика фотолюминесценции перовскита с ККТ в длинноволновую область, что связано с влиянием эффектов внутреннего поглощения в массиве коллоидных квантовых точек.

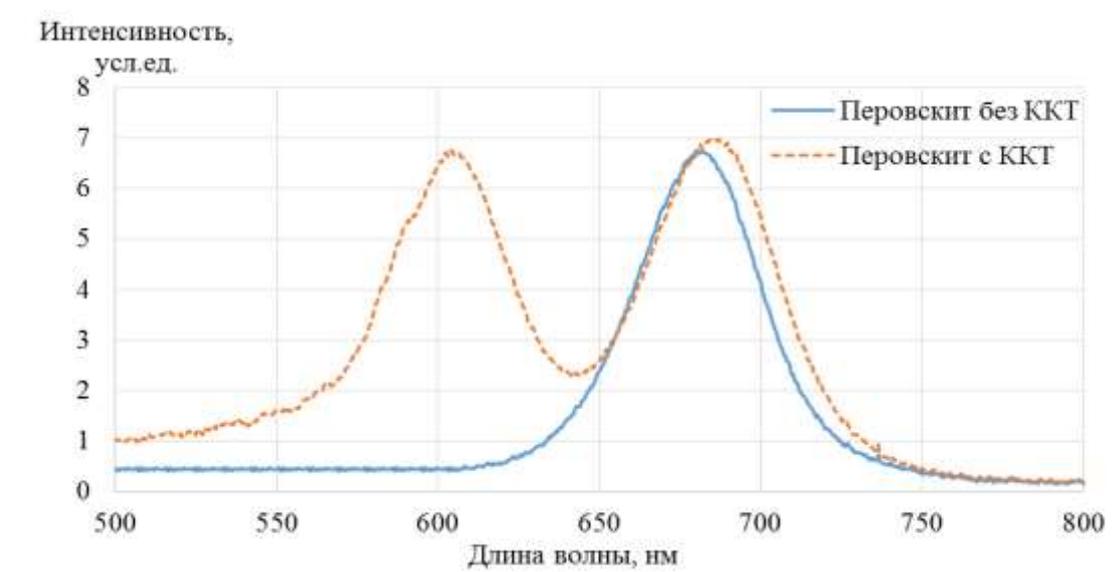


Рис. 5. Спектры фотолюминесценции пленок перовскита  $Cs_{0,05}(FA_xMA_{1-x})_{0,95}PbI_yBr_{3-y}$  с коллоидными квантовыми точками CdSe/ZnS 600 и без.

По итогу работы, можно сказать, что коллоидные квантовые точки CdSe/ZnS улучшают фотолюминесценцию перовскитов  $MAPbI_3$  и  $Cs_{0,05}(FA_xMA_{1-x})_{0,95}PbI_yBr_{3-y}$ . Результаты работы направлены на дальнейшее включение коллоидных квантовых точек с пиком фотолюминесценции в инфракрасной области в структуру перовскита, чтобы повысить эффективность солнечных элементов в будущем.

### Список литературы

1. Wang, K., Yang, D., Wu, C., Sanghadasa, M., Priya, S., Recent Progress in Fundamental Understanding of Halide Perovskite Semiconductors, Progress in Materials Science (2019)
2. С.Б. Бричкин, В.Ф.Разумов. Коллоидные квантовые точки: синтез, свойства и применение. Успехи химии, 2016
3. Kuzmina U.A., Degterev A.E., Polityko S.V., Chernyaeva K., Romanovich M.M., Study of the Technological Parameters Influence of the Thin Films Formation of the Crystal Structure Perovskite  $MAPbBr_3$  on Optical Properties, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon-Rus).

## РАЗРАБОТКА КОНЬЮГАТОВ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА С ОКСИДОМ АЗОТА

М.В.ШУМИЛО<sup>1,2</sup>, Д.В. КОРОЛЕВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>НИЛ нанотехнологий Центра экспериментального биомоделирования Института экспериментальной медицины ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России

**Аннотация.** В работе проведён небольшой анализ литературы на тему взаимодействия НЧ серебра и оксида азота. Была предпринята попытка по созданию их конъюгата. Сделан анализ получившегося раствора.

**Ключевые слова:** наночастицы, серебро, конъюгат, меркаптоянтарная кислота, оксид азота(II)

В быстро развивающейся области нанотехнологий материалы из благородных металлов пользуются большой популярностью среди исследователей благодаря своим уникальным физическим, химическим и биологическим свойствам. Эти материалы можно использовать в системах доставки лекарств, биовизуализации, биосенсорах и антимикробной активности, используя их свойства. В связи с появлением бактериальных штаммов с множественной лекарственной резистивностью антимикробные свойства благородных металлов, а также их сочетания с различными антимикробными агентами, широко исследуются, чтобы сделать их эффективными против этих бактерий. Устойчивость бактериальных патогенов к противомикробным препаратам стала глобальной проблемой. Классические методы изобретения новых антибактериальных средств недостаточно, чтобы восполнить этот пробел. За счет открытия новых классов антибиотиков и химически модифицируя существующие, может быть улучшена эффективность против различных бактериальных штаммов [1].

НЧ серебра (AgNPs) обладают уникальными электрическими, оптическими и каталитическими свойствами, что привело к исследованию и производству продуктов для адресной доставки лекарств, диагностики, обнаружения и визуализации патогенов. Однако именно исключительная антибактериальная активность, проявляемая AgNPs, привлекла внимание исследователей и представителей промышленности к этому материалу. AgNPs показали антимикробную активность в отношении различных инфекционных и патогенных микроорганизмов, включая бактерии с высокой лекарственной резистивностью. Потенциал AgNP как антимикробного средства связан с различными способами воздействия, которые одновременно воздействуют на микроорганизмы разными методами и уничтожают различные типы бактерий [2,3].

Свободнорадикальный оксид азота (NO) представляет собой эндогенную молекулу, которая контролирует несколько важных биологических процессов, таких как вазодилатация, заживление ран, окислительный стресс, апоптоз, иммунная защита и др. В зависимости от концентрации NO оказывает цитотоксическое и антимикробное действие. Экзогенное введение NO было зарегистрировано как токсическое средство для прокариотических клеток, которое оказывает мощное антибактериальное действие.

Ввиду разнообразия путей воздействия бактериям трудно выработать устойчивость к NO. Поскольку NO является газом и свободным радикалом, его прямое использование сталкивается с рядом практических ограничений. Низкомолекулярные доноры NO, такие как S-нитрозотиолы (RSNO), в том числе S-нитрозомеркаптоантарная кислота (S-нитрозо-MSA), действуют как спонтанные доноры NO. Они образуются путем разрыва связи S-N с образованием свободного NO. Эти молекулы применяются в различных биомедицинских методах, включая антибактериальные эффекты [4].

Подобно AgNPs, оксид азота (NO) имеет широкий спектр применения: антибактериальное, противогрибковое и противовирусное действие. Недавно было показано, что комбинация RSNO и AgNP обладает мощным противораковым действием и противомикробным эффектом. Бактериальные микроорганизмы не развивают устойчивость к AgNP или донорам NO из-за множества механизмов их воздействия.

Было продемонстрировано [5], что NO в сочетании с AgNP оказывает синергический эффект при использовании в качестве антибактериального средства. Таким образом, комбинация NO донора с AgNPs в биоматериалах может найти важное применение в качестве противомикробного препарата.

**Целью работы** являлась разработка метода синтеза конъюгатов НЧ серебра с оксидом азота и исследование их свойств.

НЧ серебра были синтезированы цитратным методом [6]. Спектр поглощения синтезированного коллоидного раствора серебра был получен с помощью спектрофотометра Unico 2802s (Usino Sys, США), полоса поглощения, соответствующая плазмонному эффекту (максимум 419 нм), коррелирует с приведенной в литературе [7]. Свойства полученного раствора, а именно распределение по размерам, полидисперсный индекс (PDI), дзета-потенциал и концентрация были определены с помощью Zetasizer Ultra (Malvern Instruments Ltd, Великобритания). Количество частиц, определенное методом динамического рассеяния света (ДРС), составляет  $5,503 \cdot 10^{15}$  частиц/мл, что соответствует 0,0015 г/мл. Объемное распределение по размерам имеет преобладающий узкий пик (размер 7,1 нм, объем 23,42%) (рис.1,а), что свидетельствует об однородности фракционного состава НЧ, а PDI=0,3428 НЧ Ag подтверждает это, при этом средний размер частиц составляет 38,94нм. Среднее значение дзета-потенциала НЧ Ag составляет 42,76 мВ (рис.1,б). Такое значение электрокинетического потенциала говорит о хорошей коллоидной устойчивости суспензии.

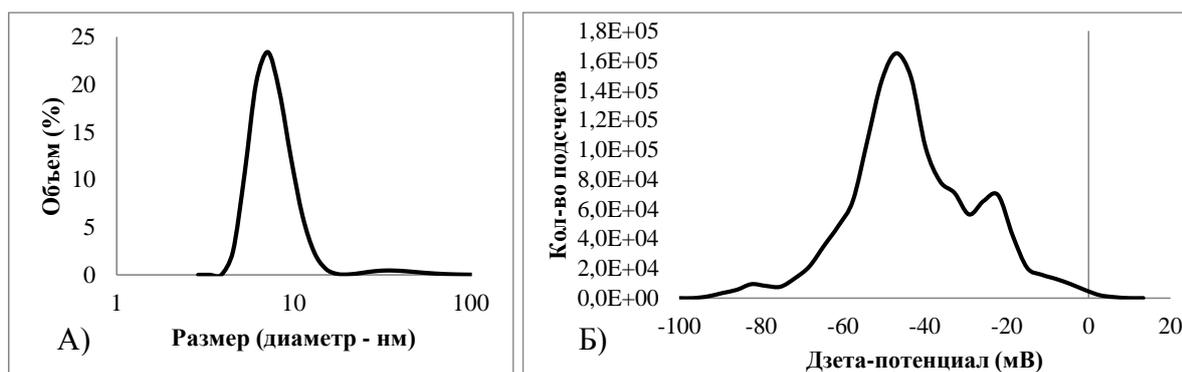


Рис.1. А) Распределение размеров НЧ серебра в растворе по объему;

Б) Дзета-потенциал НЧ серебра в растворе.

Для иммобилизации оксида азота на поверхности наночастиц серебра была синтезирована оболочка-спейсер при помощи меркаптоянтарной кислоты (MSA). Предположительно при синтезе образуется два вида оболочек за счет тиольной и карбоксильной групп (рис. 2). При этом было замечено, что если оставить раствор без иммобилизации оксида азота, частицы начинают коагулировать, что, возможно, связано с взаимодействием между собой двух оболочек, что приводит к выпадению осадка.

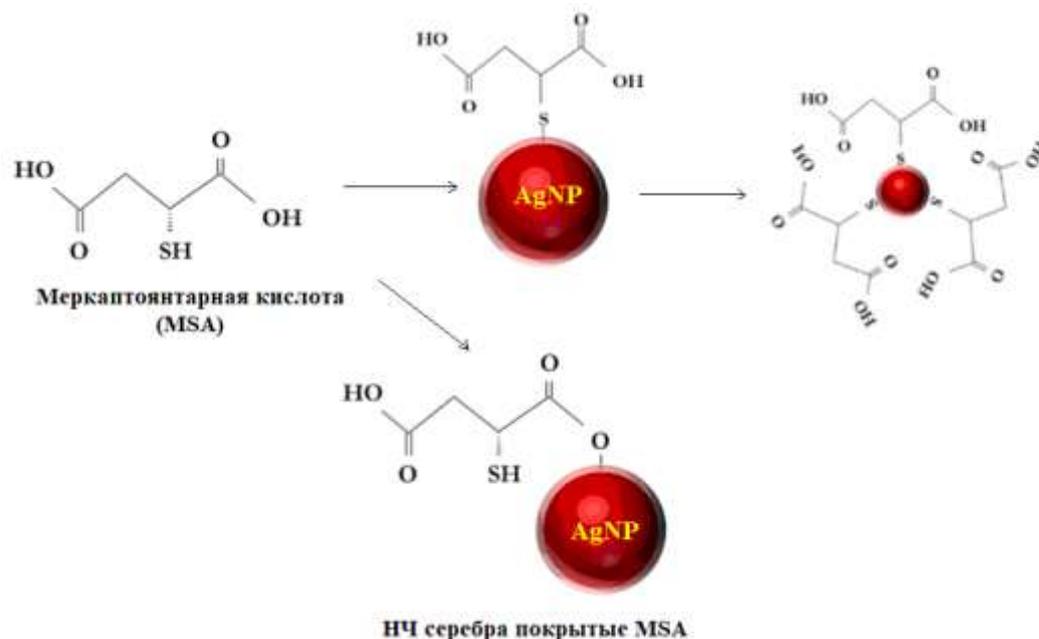


Рис.2. Схема синтеза MSA-AgNPs.

Для предотвращения подобного эффекта мы проводили нитрозирование свободных тиольных групп на поверхности MSA-AgNPs с помощью нитрита натрия ( $\text{NaNO}_2$ ), что приводило к образованию S-нитрозо-MSA-AgNPs, которые способны действовать в качестве спонтанных доноров NO (рис. 3).

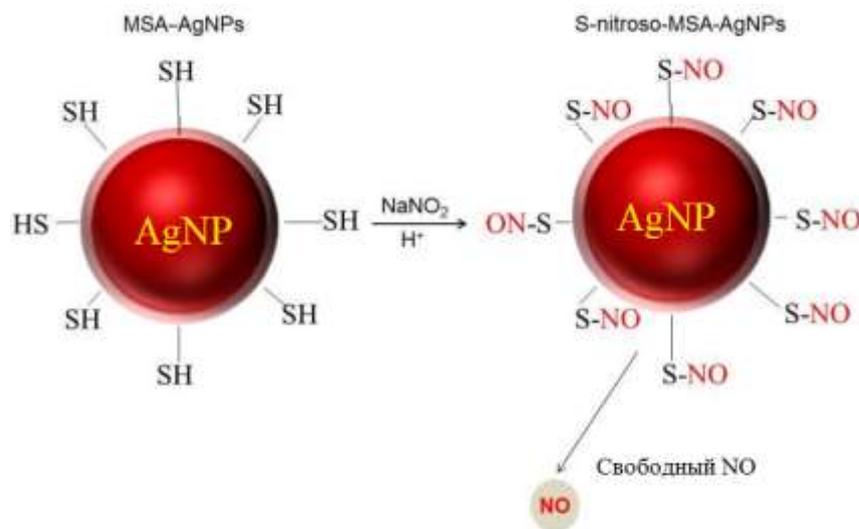


Рис.3. Схематическое изображение нитрозирования.

В результате был получен коллоидный раствор устойчивый в течении длительного времени, содержащий два вида наночастиц: конъюгаты НЧ серебра с оксидом азота(S-нитрозо-MSA-AgNPs) и НЧ серебра покрытые MSA (MSA-AgNPs). Объемное распределение по размерам имело два максимума: MSA-AgNPs (размер 43,68 нм, объем 6,124%) и S-нитрозо-MSA-AgNPs (420 нм, 8,87%) (рис. 4,а), увеличенный размер указывает на образование оболочек, при этом сохраняется однородность фракционного состава НЧ, так как PDI=0,294.

Дзета-потенциал наночастиц в суспензии также имел два экстремума  $-41,26$  мВ и  $29,722$  мВ (рис. 4,б). Этот факт также подтверждает наличие частиц двух видов, при этом большие значения зарядов указывают на стабильность коллоидного раствора.

В результате был получен устойчивый коллоидный раствор с удовлетворяющим нас размером частиц. В дальнейшем планируется провести ряд экспериментов подтверждающих наличие оболочек с NO, а также опыты для проверки цитотоксичности и антибактериального эффекта.

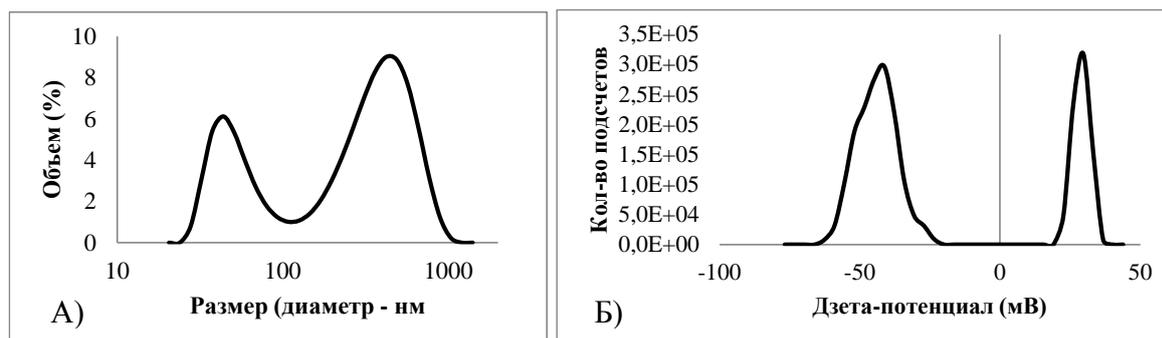


Рис.4. А) Распределение размеров частиц полученного раствора по объему;

Б) Дзета-потенциал полученного раствора

### Список литературы

1. A. Kaur and R. Kumar, «Enhanced bactericidal efficacy of polymer stabilized silver nanoparticles in conjugation with different classes of antibiotics.» RSC Advances, vol. 9, no. 2, pp. 1095-1105, 2019, doi: 10.1039/c8ra07980c.
2. Bruna T, Maldonado-Bravo F, Jara P, Caro N. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. International Journal of Molecular Sciences. 2021; 22(13):7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
3. J. J. Costa, H. Hosseinzadeh, D. K. Saha, S. U. A. Mahmud, B. M. M. Uddin and Z. A. Ratan, «Green Synthesis of Silver Nanoparticles using Citrus aurantifolia (Bangladeshi Lemon Leaf) Extract and Its Antibacterial Activity,» 2021 IEEE International Biomedical Instrumentation and Technology Conference (IBITeC), 2021, pp. 29-32, doi: 10.1109/IBITeC53045.2021.9649155.
4. Urzedo, A., Gonçalves, M., Nascimento, M., Lombello, C., Nakazato, G. and Seabra, A., 2020. Multifunctional alginate nanoparticles containing nitric oxide donor and silver nanoparticles for biomedical applications. Materials Science and Engineering: C, 112, p.110933.
5. A. L. Urzedo, M. C. Gonçalves, M. H. M. Nascimento, C. B. Lombello, G. Nakazato, and A. B. Seabra, «Cytotoxicity and Antibacterial Activity of Alginate Hydrogel Containing Nitric Oxide Donor and Silver Nanoparticles for Topical Applications.» ACS Biomaterials Science & Engineering, vol. 6, no. 4, pp. 2117-2134, 2020, doi: 10.1021/acsbiomaterials.9b01685.
6. Ooi M.L. et al. Topical Colloidal Silver for the Treatment of Recalcitrant 70 Chronic Rhinosinusitis // Front. Microbiol. Frontiers Media S.A., 2018. Vol. 9, № APR. P. 720.
7. Khatami M. et al. Biosynthesis of Ag nanoparticles using Salicornia bigelovii and its antibacterial activity // Electron. Physician. Mehr Publishing Group, 2018. Vol. 10, № 4. P. 6733–6740.

## СРАВНЕНИЕ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ США, ЕС И РФ

О.Ю. БОЧАРОВА

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

**Аннотация.** Сертификация авиационной техники — один из важнейших процессов ее создания, поскольку сертификационные процессы начинаются еще на этапе закладывания требований к будущему изделию и формирования технического задания, коренным образом оказывая воздействие на формирование конечного варианта исполнения изделия. Благодаря сертификации разработанные комплектующие изделия получают одобрение на установку в воздушные суда гражданской авиации, что подтверждает безопасность их эксплуатации и соответствие нормам летной годности. В качестве результатов проведенного исследования в тексте статьи сформулированы основные критерии сравнения сертификационных систем США, ЕС и РФ, которые помимо текстового представления сформированы в виде сравнительной таблицы.

**Ключевые слова:** сертификация, авиационная техника, гражданская авиация.

В процессе сертификации авиационной техники, ввиду его масштабности, задействованы сотрудники компаний из различных сфер, что в свою очередь помогает поддерживать всестороннее обеспечение процесса квалифицированными специалистами на любом его этапе.

Исследование процесса сертификации комплектующих изделий авиационной техники будет неполным без сравнения действующей в РФ сертификационной системы с зарубежным опытом, поскольку имеющиеся преимущества, слабые стороны и проблемы легче заметить при проведении параллелей между сертификационными системами, применяемыми на международном уровне.

Для исследования были выбраны крупнейшие конкуренты на рынке гражданской авиации — Европейский союз и США.

Головными управляющими органами для США и ЕС являются Федеральная авиационная администрация (FAA) и Европейское агентство по безопасности полетов (EASA) соответственно.

США и ЕС имеют сильную единообразную структуру сводов, правил и стандартов, распространяющих свое действие на гражданскую авиацию. Целью о достижении единообразия между авиационными правилами FAA и EASA была поставлена для совершенствования сотрудничества по вопросам обеспечения безопасности полетов, легкости взаимодействия между государственными организациями, достижения высоких экологических показателей на международном уровне.

Россия, несмотря на занимаемую большую долю рынка гражданской авиации, не имеет достаточной степени гармонизации принятых сводов правил, чтобы вступить в международные соглашения, обеспечивая достижение общих целей по безопасности полетов, экологичности производств и эксплуатации судов, а также непрерывного совершенствования отрасли гражданской авиации [1].

В ЕС и США высоко развит уровень взаимодействия авиационных властей и предприятий разработчиков и производителей авиационной техники в части формирования регламентирующей документации. При написании правил и стандартов, регламентирующих деятельность конкретных организаций, важно слышать запросы тех, кто будет в своей работе руководствоваться разрабатываемой документацией.

Такой подход не только повышает уровень доверия между авиационными властями и предприятиями, но и повышает конкурентный уровень компаний-разработчиков на международном рынке.

В РФ проработкой и обсуждением значимых вопросов при написании регламентирующей документации занимаются отдельные люди по собственной инициативе, поскольку такой алгоритм взаимодействия на уровне Росавиации нигде не закреплен. Такой несовременный подход, имеющий официальное действие в развитой стране, дает право конкурентного преимущества авиационным властям тех стран, что зафиксировали контакт с разработчиками много раньше.

Несмотря на то, что необходимость проведения сертификации организации-разработчика закреплена в ФАП-21 (EASA p.21; 14CFR Part 21) во всех трех рассматриваемых сертификационных системах гражданской авиации, практические рекомендации для проведения оценки сертифицированных организаций описаны только в США и ЕС, что опять же дает конкурентное преимущество их компаниям-разработчикам комплектующих изделий авиационной техники [2].

В качестве еще одного критерия для сравнения сертификационных систем гражданской авиации США, ЕС и РФ можно выделить наличие стандартов или рекомендательных материалов на уровне авиационных властей по условиям технического обслуживания выпущенных изделий, их эксплуатации, установление графиков плановых ремонтов, своевременное внесение модификаций и прочее.

В РФ условия эксплуатации, рекомендации по техническому обслуживанию и т.д. устанавливает и описывает сам разработчик изделия, включая перечисленные аспекты в комплект эксплуатационной документации. Отсутствие единых регламентирующих документов, разработанных авиационными властями, дает свободу разработчикам относительно подробности включаемой в эксплуатационную документацию информации, что усложняет в конечном итоге читаемость нужной информации для предприятия, собирающего воздушное судно.

В США и ЕС инструктивный материал для организаций-разработчиков по техническому обслуживанию и эксплуатации активно применяется, упрощая координацию имеющихся данных для конечных производителей воздушных судов.

Из описанных выше фактов, отражающих основные аспекты сертификационных систем США, ЕС и РФ, сформирована таблица 1, объединяющая в себе все рассмотренные критерии.

Таблица 1

**Сравнение основных аспектов сертификационных систем гражданской авиации США, ЕС, РФ**

<b>Критерий</b>	<b>США</b>	<b>ЕС</b>	<b>РФ</b>
Головной орган гражданской авиации	Федеральная авиационная администрация	Европейское агентство по безопасности полетов	Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация)
Гармонизация международных сводов правил	Да	Да	Нет

Критерий	США	ЕС	РФ
Сотрудничество авиационных властей с предприятиями в части разработки регламентирующей документации	Да	Да	Нет
Наличие рекомендательного материала по оценке сертифицированных разработчиков	Да	Да	Нет
Наличие рекомендательного материала по техническому обслуживанию и эксплуатации изделий	Да	Да	Нет

Несмотря на наличие отклонений от международных норм, принятых основными конкурентами, система, действующая на территории РФ, не раз доказывала свою эффективность благодаря высокому уровню и качеству отечественных разработок в области авиационной техники.

Однако организация взаимодействия с зарубежными коллегами на уровне ведомств может оказать положительное воздействие на уровень компаний-разработчиков и усиление их конкурентоспособности за счет привлечения новых покупателей международного уровня.

Взаимное развитие — основа успеха при построении эффективной и успешной сертификационной системы в области гражданской авиации.

#### Список литературы

1. Ахметшин Т.Ф. Сертификация авиационной техники // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета — 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 10-18.
2. Александровская Л. Н., Кузнецов А. Г., Солонников Ю. И. Анализ зарубежного опыта сертификации бортовых систем воздушных судов // Труды Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). Вып. 2: Навигация и управление летательными аппаратами. М.: МИЭА, 2010. С. 36-51.

## ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РИСКОВ ОРГАНИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СЕРТИФИКАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

О.Ю. БОЧАРОВА

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

**Аннотация.** В современном мире воздушные перевозки как пассажирские, так и грузовые являются наиболее быстрым и безопасным способом перемещения. Сертификация авиационной техники — важнейший процесс обеспечения безопасности воздушных перевозок, так как позволяет закладывать необходимые требования к воздушному судну, проходящие через все уровни от летательного аппарата до его систем и подсистем, тем самым увеличивая вероятность того, что конечный вариант изделия будет полностью соответствовать нормам летной годности, а также выполнять все функции, заложенные изначально при проектировании объекта. В данной статье приведены методы идентификации риска, позволяющие наиболее глубоко проникнуть в процесс сертификации авиационной техники, а также обоснование их применения.

**Ключевые слова:** сертификация, система менеджмента качества, риск-ориентированный подход, идентификация рисков

Обеспечение безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации положено в основу установления норм летной годности авиационной техники. Процедура сертификации в общем назначении призвана помогать в достижении целей обеспечения безопасности воздушных перевозок.

Основной целью сертификации авиационной техники является подтверждение соответствия воздушного судна в целом и каждой его отдельной системы нормам летной годности.

Необходимость деления воздушного судна на системы и подсистемы возникла в связи с развитием отрасли авиационной техники. С течением времени оборудование, разрабатываемое для установки в воздушное судно, усложняется, растет количество исполняемых функций, а, следовательно, и вероятность заложить ошибку на этапах проектирования и разработки. Поэтому в соответствии с общемировой практикой летательный аппарат разделяется на системы и подсистемы в соответствии с функциональной принадлежностью каждой.

С одной стороны, практика деления воздушного судна на множество мелких систем позволяет более детально проработать индивидуальные требования к каждому конкретному комплектующему изделию, обеспечивая таким образом тщательную проверку реализации разработанных требований.

С другой стороны, для каждой системы должны быть индивидуально разработаны документы от проекта и до полного комплекта рабочей документации. Большую часть разрабатываемых документов составляют документы процесса сертификации. Процесс сертификации комплектующих изделий авиационной техники предполагает разработку большого количества сопроводительной документации, так как сопровождает изделие на этапах его жизненного цикла от планирования и до установки разработанного комплектующего изделия в состав воздушного судна.

Во время сертификации комплектующих изделий авиационной техники к работе привлекается большое количество людей, которые на протяжении всего процесса сертификации участвуют в разработке и коррекции сопроводительной документации. Поэтому стоит заметить, что сертификация комплектующих изделий авиационной техники является процессом, в котором задействованы обширные человеческие и финансовые ресурсы. Для получения разрешительной документации на разрабатываемое комплектующие изделие каждая компания закладывает определенное финансирование, которое в конечном счете влияет на стоимость реализуемых изделий.

Вложение значительных финансовых ресурсов влечет за собой возникновение различных рисков. Количество разрабатываемой документации, количество участвующих в разработке человек и количество документации, с помощью которой необходимо подтвердить соответствие объекта нормам летной годности — напрямую влияет на разнообразие и вероятность возникновения различного рода рисков.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что сертификация комплектующих изделий авиационной техники — это продолжительный процесс, требующий своевременной и корректной подготовки большого объема сопроводительной документации. Так как процесс имеет множество этапов и стадий утверждения сопроводительной документации, каждый из которых сопрягается с определенным набором требований к оформлению, возникает необходимость проведения оценки рисков.

Поскольку в процессе сертификации задействованы сотрудники различных подразделений, то для достижения наиболее полного перечня возможных рисков на всех

стадиях процесса стоит привлечь каждого, кто принимает участие в подготовке сопроводительной документации. В этом случае более других уместно применение таких методов идентификации рисков как «Метод Мозгового штурма» и метод «Что, если?..».

Оба этих метода предполагают участие большого количества человек, что соответствует специфике процесса сертификации авиационной техники.

Метод «Мозгового штурма» заключается в интенсивной генерации всевозможных идей большим количеством участников. Применяя этот метод, важно учитывать все возникающие версии, не подвергая их критике. [1]

Ситуации применения «мозгового штурма» наиболее распространены, поскольку не требуют специальной подготовки. Такой метод может быть стихийно применен в процессе проведения рядового рабочего совещания. Участие сотрудников разных должностных позиций позволяет рассмотреть вопрос с совершенно разных ракурсов. Остается только дать возможность выразить свои мысли каждому, пусть даже некоторые варианты на первый взгляд будут казаться неприменимыми. Порой самые неожиданные предположения при групповом рассмотрении превращаются в убедительную и правдивую версию реального положения дел.

Суть метода «Что, если?..» заключается в том, чтобы, следуя неизменной словесной конструкции, проработать сценарии, разветвляя количество возможных рисков и ассоциируя их между собой по определенным ситуациям. [1]

Применение метода «Что, если?..» требует предварительной подготовки, присутствия грамотного организатора. Но несмотря на сложности, этот метод позволяет сценарно проработать версии и учесть большее количество связанных факторов, благодаря ситуативной привязке обсуждаемого вопроса.

Эти методы наиболее предпочтительны, поскольку позволяют охватить большое количество сотрудников, отражая профессиональную ценность каждого.

Учет различных взглядов на проблемы сертификации и сопутствующие риски — важнейшее преимущество применения упомянутых выше методов, поскольку процесс сертификации начинается задолго до проектирования первого изделия, а заканчивается при постановке разработки на серийное производство.

#### **Список литературы**

1. Риск-менеджмент/ М. Хабибулин //ISO 9001:2015 — новые инструменты бизнеса — 2015 — №3, с. 4-12.

## **АНАЛИЗ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ПРОДВИЖЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ СТАРТАПА И ВЫЯВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

М.Л. ГРИГОРЬЕВА, М.А. КОСУХИНА

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

**Ключевые слова:** *лендинг, мономаркетплейс, бизнес-процесс, продвижение образовательных услуг.*

В рамках данной статьи под бизнес-процессом продвижения образовательных услуг предлагается понимать это комплекс маркетинговых мероприятий, направленных

на повышение узнаваемости компании её продуктов, увеличение целевой аудитории, а также стимулирование продаж [1].

В организационной структуре стартапа присутствует маркетинговый отдел, который выполняет различные функции, описанные выше. Одной из главных функций отдела является обеспечение максимальной осведомленности потенциального потребителя о существующих курсах, увеличение целевой аудитории и стимулирование продаж с использованием лендинговых страниц.

Сейчас в школе представлено девять курсов. Под некоторые из них создана посадочная страница (лендинг)[2]. На странице происходит оставление заявки и покупка курса. Но местонахождение этих лендингов не структурировано. Часть из них находятся в описаниях под видео на YouTube, другая часть в различных социальных сетях. Под какими-то видео или постами говорится о курсе, в остальных же нет.

На данный момент в стартапе ведутся социальные сети: ВКонтакте, Instagram и Telegram, а также видео платформа YouTube (где представлен только контент основателя школы). Изначально канал на YouTube не планировался использоваться как продающая платформа. Однако постепенно были созданы первые курсы, где данная площадка была единственным методом их огласки. Вскоре появились группы в Instagram, Telegram и ВКонтакте, но по задумке они также не задумывались только для продажи курсов. Их целью было — создать интерес для интересующихся сферой.

В итоге было решено отвести только малую часть постов для рекламы платных курсов, чтобы не вводить посетителей в вечное ощущение «рынка». В настоящее время курсы в основном покупают постоянные зрители и посетители представленных сетей, потому что видят практически каждый пост и имеют доверие к создателю.

Поэтому только у некоторых роликов (или постов) есть определенная ссылка, ведущая на лендинг продукта (курса).

Лендинг или посадочная страница — это одностраничный сайт, который призывает пользователя что-то сделать (в нашем случае, совершить покупку).

В рамках существующего бизнес-процесса «Продвижение образовательных услуг» главной задачей является обеспечение заинтересованности потенциальных клиентов человеку интересен ролик, он был настроен на покупку и перейти по ссылке, а после перехода, читая описание, захотел купить продукт.

Рассматриваемый бизнес-процесс образовательных услуг является процессом нижнего уровня. Для целей анализа требуется максимально простое описание БП, которое будет понятно широкому кругу лиц. Кроме того, требуется обеспечение возможности разграничение зон ответственности по операциям в рамках рассматриваемого бизнес-процесса. Для создания модели бизнес-процесса была выбрана нотация Cross-functional Flowchart. Основными преимуществами данной нотации является простота графического отображения, выполнение любого процесса, поскольку она основана на известной всем нотации блок-схем; данная нотация позволяет отобразить ответственных за выполнение операций (присутствуют дорожки, которые определяют исполнителя бизнес-процесса (человека или команду), который отвечает за определенные действия бизнес-процесса) в бизнес-процессе и применима к БП нижнего уровня.

Рассмотрим бизнес-процесс «Продвижение образовательных услуг» в модели «как есть» (рис. 1).

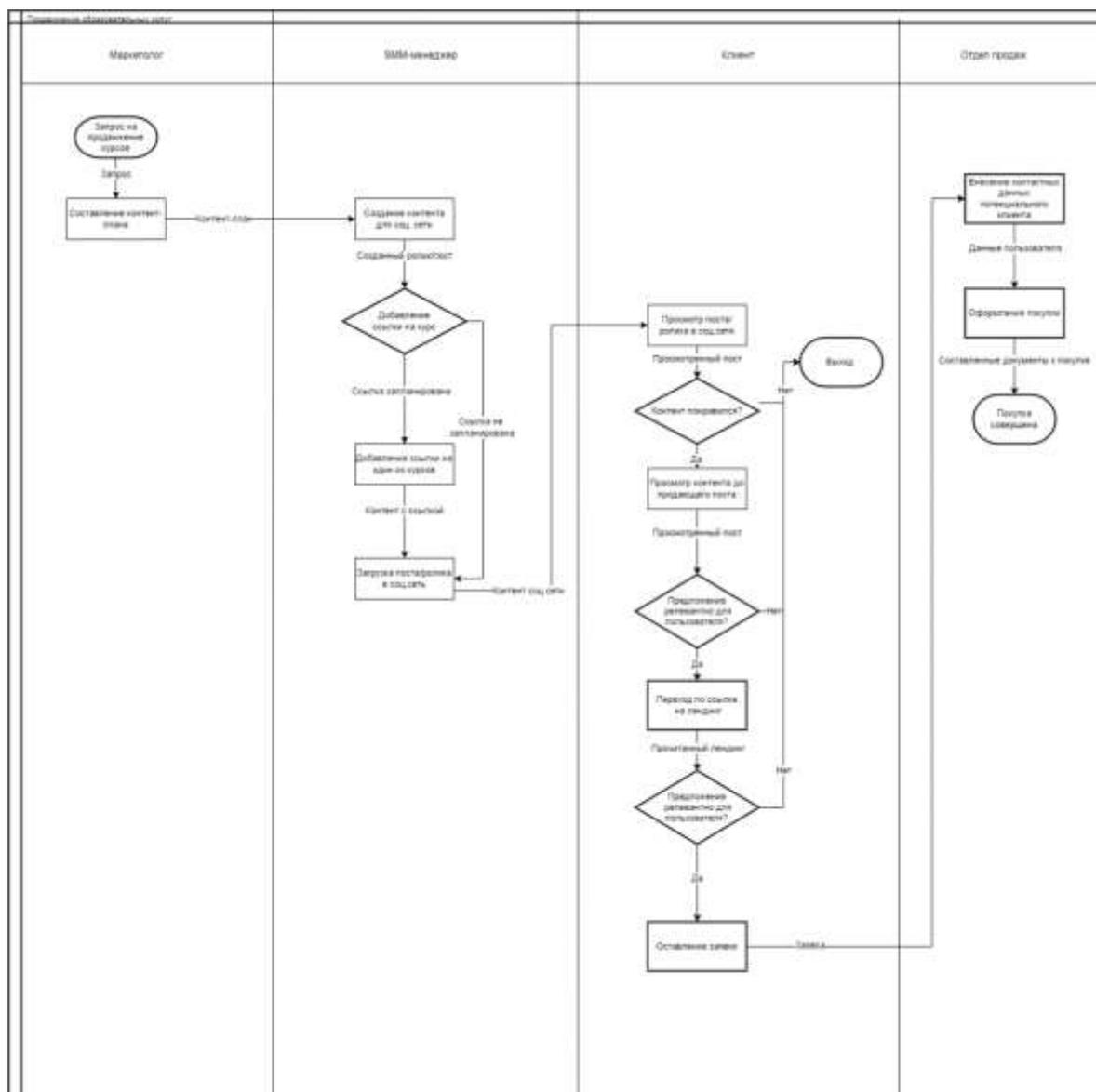


Рис.1. Бизнес- процесс «Продвижение образовательных услуг» в модели «как есть».

Задача маркетолога в рамках данного бизнес-процесса — составление контент-плана для социальных сетей. Контент-план — это инструмент для планирования публикаций в социальных сетях. В нем представлена тема и краткое описание поста для дальнейшего написания SMM-специалиста. Также маркетолог определяет, будет ли в посте реклама курса или нет.

Далее SMM-специалист создает и выкладывает запланированный контент в зависимости от контент-плана маркетолога.

Клиент просматривает выложенный контент в одной из социальных сетей. В зависимости от того, заинтересовал его этот контент либо нет, он либо продолжает чтение (просмотр), либо сразу уходит с площадки. При заинтересованности одним постом, человек обычно продолжает просмотр и другого контента и, в итоге, рано или поздно наткнется на продающий пост (видео). Остаться или нет — зависит от того, был ли он настроен на потенциальную покупку, а также подошла ли она ему исходя из его потребности.

Если все-таки потенциальный покупатель пройдет все эти ступени и не уйдет, то он оставляет заявку, которую обрабатывает отдел продаж. Далее отдел продаж работает с клиентом для того, чтобы он совершил покупку.

Вероятность того, что ему в совокупности будет релевантен контент, на который он зашел, курс, который рекламируется в этом посте и его заинтересует лендинг, на который он перешел, очень мала. Плюс ко всему он не видит всех продуктов. А ведь, возможно, при неподходящем первом продукте, ему понравился бы ряд других.

Значимость процесса «Продвижение курсов школы» для всей компании заключается в том, чтобы повысить узнаваемость бренда, повысить прибыль компании и репутацию.

В результате анализа бизнес-процесса «Продвижение образовательных услуг» сделан вывод о том, что путь покупателя до покупки состоит из множества его выборов. На каждом выборе мы теряем потенциального клиента. Поэтому стоит пересмотреть и переделать весь существующий бизнес-процесс.

Таким образом, сформулируем текущие проблемы процесса «Продвижения образовательных услуг» компании.

1. Отсутствие возможности просмотра всей палитры курсов. Потенциальные покупатели не имеют точного представления, где купить тот или иной курс, а многие заинтересованные в сфере люди не настроены на покупку. Социальные сети школы изначально не предполагали предложение продаж. Набранная аудитория просто привыкла смотреть там информацию без прямой рекламы. Поэтому социальные сети школы не будут ими восприниматься, как-то место, где можно что-то купить.

2. Отсутствие сбора статистики. Из существующей информации невозможно проследить количество кликов на курсы, откуда они были совершены и была ли сделана покупка. При покупке рекламы в социальной сети также невозможно отследить, кликали ли по ссылке. А значит — не будет аналитики по рекламе и невозможно будет выявить самые эффективные каналы. Для дальнейшего анализа продвижения и проведения корректирующих действий необходимо внедрение инструмента по сбору статистики.

3. Отсутствие возможности масштабирования при увеличении количества курсов. Даже если и продублировать все девять курсов в контенте социальных сетей, то это еще возможно. Но, если курсов станет сто и более? Тогда такой метод станет практически невозможным. Понадобится отдельная площадка, на которой можно будет удобно искать и сортировать продукты.

При вышеперечисленных проблемах возможны три варианта решения проблем: обыкновенная вставка в посты всех ссылок на курсы, создание собственной обучающей платформы или создание моно-маркетплейса для переадресации на уже готовые лендинги.

Первый вариант можно исключить сразу из-за нескольких соображений. Во всех социальных сетях невозможно будет продублировать все ссылки на курсы. Во-первых, это будет очень долгая и рутинная работа, за которую нужно дополнительно платить задействованным сотрудникам. Во-вторых, это может вызвать раздражение со стороны посетителей социальных сетей. Контент, загромождённый ссылками, будет крайне нечитабельный и будет восприниматься как прямая реклама курсов и не более того.

Второй вариант заключается в создании полноценного сайта, где будут выставлены все существующие курсы, а лендинги станут ненужными. На таком сайте предполагается вставка всех материалов по курсу, загрузка интерактива, возможность оплаты и т.д.

Третий вариант — создание моно-маркетплейса со ссылкой на существующие лендинги. При таком варианте усилия будут незначительны, так как остается возможность пользоваться уже созданными материалами.

Маркетплейс (торговая площадка) — это онлайн-платформа для продажи и покупки товаров и услуг через интернет. Продавцы размещают на маркетплейсах свои товары, покупатели выбирают лучшие варианты по ценам, характеристикам и другим параметрам. Задачи маркетплейсов:

1. Обеспечивать продвижение товаров.
2. Привлекать трафик.
3. Делать сайт и поиск товаров удобными.
4. Увеличивать продажи селлеров [3]

В нашем случае не предполагается создания маркетплейса в классическом понимании, так как продукты (курсы) будут представлены только от одной компании. Данное решение можно назвать «моно-маркетплейс».

#### Список литературы

1. Единая платформа для маркетинга и продаж URL: <https://sendpulse.com/ru/support/glossary/brand-awareness>
2. Платформа Стартапы, бизнес, технологии URL: <https://www.activetraffic.ru/wiki/landing-page/>
3. Сервис Active Traffic URL: <https://vc.ru/trade/153102-kak-uvlichit-prodazhi-na-marketpleysah>

## ОБЗОР МЕТОДИК ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Е.Д. ГУХМАН, М.А. КОСУХИНА

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

**Аннотация.** В рамках данной статьи рассмотрены основные подходы и методики к оценке эффективности инновационных проектов, приведена классификация данных методик и даны рекомендации по их использованию в зависимости от модели жизненного цикла инновационного проекта.

**Ключевые слова:** оценка эффективности проекта, инновационный проект, каскадная модель, инкрементная модель, итеративная модель жизненного цикла проекта.

Понятие эффективности инновационного проекта в настоящее время является дискуссионным. Ряд авторов [1-3] рассматривает эффективность инновационных проектов с точки зрения экономики общества в целом, другие определяют эффективность проекта с позиций общественной (социально-экономической) и коммерческой эффективности проекта [4,5]. В работах [6,7] термины эффективность и результативность проектов используются в качестве синонимов. Так, Parast применяет как термин «эффективность», так и «результативность» в обсуждения влияния проектов «Шесть сигм» на инновации и эффективность компании. DeToro and McCabe [8] рассматривает эффективность проекта, как «соответствие всем внутренним требованиям по затратам, марже, использованию активов и другим показателям результативности». В рамках данной статьи под эффективностью инновационного проекта предлагается понимать — меру соответствия инновационного проекта ожидаемым целям, задачам

и выгодам всех хозяйствующих сторон, которые принимают участие в его оценке и реализации. Наиболее существенной характеристикой, описывающей выгоды заинтересованных сторон, согласно теории А.Смита, является прибыльность капиталовложений.

На сегодняшний день существует множество подходов к оценке эффективности инновационных проектов. Среди них можно выделить метод освоенного объема, рекомендованный к применению PMBoK 6 [9], метод чистого дисконтированного дохода (NPV), рекомендованный центром международного промышленного сотрудничества UNIDO [10], метод сбалансированной системы показателей (BSC) [11], методика экономической добавленной стоимости (EVA) [12], методика совокупной стоимости владения (TCO) [13], методика быстрого экономического обоснования (REJ) [14].

Практически все из перечисленных вариантов могут быть разделены на методики, основанные на комплексном подходе и методики, которые базируются на оценке прибыльности капиталовложений. По мнению авторов, среди методик оценки эффективности, основанных на комплексном подходе, можно выделить: сбалансированную систему показателей, методику совокупной стоимости владения (TCO), методику быстрого экономического обоснования (REJ). К методикам оценки прибыльности капиталовложений можно отнести такие методики, как чистая дисконтированная стоимость, метод освоенного объема, методика экономической добавленной стоимости (EVA).

Важным аспектом оценки эффективности инновационного проекта является модель жизненного цикла данного проекта. Под жизненным циклом инновационного проекта авторами предлагается понимать последовательность фаз проекта, которая задается исходя из потребностей управления проектом от процесса инициации до процесса завершения проекта. Согласно стандартам, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010, ГОСТ Р 56923-2016/ISO/IEC TR 24748-3:2011 и Фреймворкам управления проектами PMBoK 6, P2M выделяют каскадную, итерационную (эволюционную) и инкрементную (спиральную) модели жизненного цикла проекта, а также гибкие модели (Agile).

Каскадная (водопадная) модель предполагает переход от одной стадии к другой строго последовательно после полного и успешного завершения предыдущей стадии. Сначала полностью завершается этап «Спецификация требований» результатом которого является получение списка требований к инновационному продукту. Далее происходит переход к проектированию, в ходе которого создаются документы, подробный способ и план реализации указанных требований, далее выполняется реализация полученного проекта, производится тестирование и внедрение продукта и обеспечивается его поддержка в процессе эксплуатации. Основным недостатком каскадной модели является невозможность «обратного» перехода, ее негибкость в условиях изменений и формальный подход к управлению. Однако, следует заметить, что при управлении большими проектами формализация позволяет кардинально снизить риски проекта и сделать его более прозрачным. Так, например, в третьей редакции PMBOK была закреплена только методика «каскадной модели» и не были предложены альтернативные варианты, известные как итеративное ведение проектов. Начиная с четвертой редакции PMBOK Институтом управления проектами (PMI) предлагается как стандарт гибридный вариант методологии управления проектами, сочетающий в себе как достоинства методологии «Водопад», так и достижения итеративных методологов.

Инкрементная модель жизненного цикла инновационного проекта сочетает в себе итеративность и этапность. Целью данной модели является быстрое получение работоспособного продукта, активизируя процесс уточнения и дополнения требований. Неполное завершение работ на каждом этапе позволяет переходить на следующий этап, не дожидаясь полного завершения работы на текущем.

Итеративная модель жизненного цикла инновационного проекта предполагает выполнение работ проекта разработки программного продукта параллельно с непрерывным анализом полученных результатов и корректировкой предыдущих этапов работы. Проект при этом подходе в каждой фазе развития проходит повторяющийся цикл Деминга (PDCA): Планирование — Реализация — Проверка — Оценка (англ. plan-do-check-act cycle). Среди преимуществ итеративной модели: снижение воздействия серьезных рисков на ранних стадиях проекта, что ведет к минимизации затрат на их устранение; организация эффективной обратной связи проектной команды с потребителем (а также заказчиками, стейкхолдерами) и создание продукта, реально отвечающего его потребностям, фокус на наиболее важные и критичные направления проекта, непрерывное итеративное тестирование, позволяющее оценить успешность всего проекта в целом, раннее обнаружение конфликтов между требованиями, моделями и реализацией проекта, более равномерная загрузка участников проекта, эффективное использование накопленного опыта.

Отдельным классом моделей жизненного цикла проекта являются гибкие модели (Agile). К ним относятся: SCRUM, XP, LEAN, KANBAN, RAD и другие. Гибкие методологии применяются в качестве эффективной практики организации труда небольших групп (которые делают однородную творческую работу) в объединении с управлением ими комбинированным (либеральным и демократическим) методом. Большинство гибких методологий нацелены на минимизацию рисков путём сведения разработки к серии коротких циклов, называемых итерациями, которые обычно длятся две-три недели. Каждая итерация сама по себе выглядит как программный проект в миниатюре и включает все задачи, необходимые для выдачи мини-прироста по функциональности: планирование, анализ требований, проектирование, программирование, тестирование и документирование. Хотя отдельная итерация, как правило, недостаточна для выпуска новой версии продукта, подразумевается, что гибкий программный проект готов к выпуску в конце каждой итерации. По окончании каждой итерации команда выполняет переоценку приоритетов разработки.

В соответствии с мнением упомянутых выше авторов предложена классификация методик оценки эффективности инновационных проектов с учетом особенностей модели жизненного цикла инновационного проекта (табл. 1).

*Таблица 1*

### **Классификация методик оценки эффективности инновационных проектов**

<b>Подход</b>	<b>Методика</b>	<b>Суть методики</b>	<b>Модель жизненного цикла инновационного проекта</b>
Комплексный подход	BSC	методика, основанная на измерении и оценке эффективности инновационного проекта по набору оптимально подобранных показателей, отражающих все аспекты деятельности проекта по четырем позициям: корпоративные финансы; внутренние бизнес-процессы; клиенты; обучение и развитие	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная

	TCO	методика расчета, основанная на определении прямых и косвенных затрат и выгод, связанных с любым компонентом инновационного проекта.	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная
	REJ	методика, основанная на анализе бизнеса в виде выявления критических для успеха проекта проблем; выборе решения в форме определения процессов проекта, в наибольшей степени связанных с критическими факторами успеха (Critical Success Factors– CSF); оценке выгод и затрат в форме денежных потоков проекта; определении рисков.	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная, гибкая
Подход на основе прибыльности капиталовложений	NPV	методика чистой дисконтированной стоимости (Net Present Value, NPV) основана на расчете суммы текущих стоимостей денежных потоков, спрогнозированных, с учетом ставки дисконтирования	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная
	EVA	методика, основанная на расчете разности чистой операционной прибыли и затратами на капитал, позволяющая оценить реальную экономическую прибыль при требуемой минимальной ставке доходности». EVA является показателем годовой рентабельности инновационного проекта, который отражает создание дополнительной стоимости проекта.	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная
	EV	система методик, объединённых под общим названием, использующихся для измерения и контроля эффективности выполнения проектов, основанная на сравнении выработанной стоимости проекта с его фактической стоимостью.	каскадная, итерационная(эволюционная), инкрементная, гибкая

Таким образом, при выборе методики оценки эффективности инновационных проектов важным аспектом является модель жизненного цикла инновационного проекта и её направленность.

### Список литературы

1. Брусакова И.А., Фомин В.И., Шепелев Р.Е. Проблемы оценки коммерческой эффективности инновационного проекта Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 2. С. 325-327.
2. Брусакова И.А., Фомин В.И., Косухина М.А., Панин С.Н. Исследование тенденций развития информационного менеджмента в современных условиях Санкт-Петербург, 2014.
3. Брусакова И.А., Фомин В.И., Косухина М.А. Проблемы системной оценки эффекта от информатизации управления в экономике и социальной сфере Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2016. Т. 2. С. 359-361.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов от 21.06.1999 N BK477
5. Martinsuo, M., & Lehtonen, P. (2007). Role of single-project management in achieving portfolio management efficiency. *International Journal of Project Management*, 25(1), 56-65
6. Parast, M. M. (2011). The effect of six sigma projects on innovation and firm performance. *International Journal of Project Management*, 29(1), 45-55.
7. Эрик Сундквист и др. / Труды — Социальные и поведенческие науки 119 (2014) 278 — 287 281
8. DeToro, I., McCabe, T. (1997). How to stay flexible and elude fads. *Quality Progress*, 30(3), 55-60. 1

9. : Руководство к своду знаний по управлению проектом (Руководство PMBOK) (A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide),2017
10. Институт управления проектамиЦентр международного промышленного сотрудничества ЮНИДО в Российской Федерации <http://www.unido.ru/>
11. Каплан Р. Нортон Д. Сбалансированная система показателей. М: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2005. — 320 с.
12. Осипов М. А. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук по теме «Концепция экономической добавленной стоимости в финансовом управлении российских компаний», Москва — 2004.
13. Писакин М.М. Оценки экономической эффективности внедрения облачного образовательного оператора на основании методики совокупной стоимости владения//Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2015. Т. 1. № 4 (4). С. 87-91.
14. Анисифоров А.Б., Анисифорова Л.О. Методики оценки эффективности информационных систем и информационных технологий в бизнесе. Учебное пособие. Изд-во: СПбГТЭУ, Санкт-Петербург, 2014. — 97 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ FACE ID ДЛЯ ЦЕЛЕЙ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Д.Е. ДЕМИДОВА, О.Д. НАУМОВА, О.С. АРТАМОНОВА

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

**Аннотация.** Данная статья посвящена анализу технологии Face ID, ее нормативной основы, а также предложены способы внедрение Face ID на предприятиях для обеспечения бережливого производства.

**Ключевые слова:** *Face ID, единая структура форматов обмена биометрическими данными (ЕСФОБД), бережливое производство, снижение потерь, постоянные улучшения.*

Научно-технический прогресс прошел довольно сложный и долгий путь развития. На данный момент мы наблюдаем высокий рост в области технологий, одной из которых является биометрия лица или, как принято сейчас называть, Face ID. Face ID — это биометрическая технология распознавания лица для его идентификации с целью подтверждения личности человека. [1]

Технология состоит в методах трехмерного и двумерного сканирования лица. Камера TrueDepth захватывает данные лица, она проецируется на него и анализирует несколько тысяч невидимых точек. В результате устройство составляет подробную структурную карту лица, а также его изображение в инфракрасном спектре. [2] Программное обеспечение способно впоследствии сопоставлять с информацией с базой данных для идентификации личности.

Изначально технология идентификации лиц была не настолько известна всем и применялась локально:

В Facial recognition technology (FRT) — данная технология широко распространена в правоохранительных органах как инструмент розыска преступников

В Physical Access Control System (PACS) — система для ограничения или разрешения доступа к объектам и зданиям банков, офисов

В аэропортах и в местах большого скопления людей для наблюдений за порядком и отслеживания

В медицине — для обнаружения генетических нарушений

Большую популярность Face ID принесла компания Apple при выпуске модели iPhone X. Тогда у людей появилась возможность не тратить время на ввод пароля и на проблемы,

возникающие при использовании Touch ID. Не только это вызвало огромный спрос, но и то, что благодаря одному взгляду на телефон можно подтверждать покупки в iTunes Store и App Store, а также при использовании Apple Pay. [2]

В современном мире люди ценят время, поэтому данная технология стала распространяться с высокой скоростью в нашей жизни. Например, в Московском метрополитене 15 октября 2021 года на всех станциях внедрили технологию Face Pay. Это значительно сократило время пассажиров, чтобы не совершать лишних движений с картами, а также позволило не создавать длинных очередей во время увеличенного пассажиропотока. [3]

Для любого продукта, нацеленного на общественное использование, необходимо соблюдать ряд требований, обеспечивающих комфортное взаимодействие с потребителями и другими производителями. Для функции Face ID существует единая структура форматов обмена биометрическими данными (ЕСФОБД), устанавливающая стандарты, необходимые для достижения полноценного обмена данными и взаимодействия в процессе биометрического распознавания в среде открытых систем. Каждый важный шаг в создании и реализации продукта регулируется с помощью ГОСТов. В случае биометрической идентификации и верификации существуют стандарты для форматов обмена данными и их структур, атрибутов безопасности данных, свойств биометрических систем, интерфейсов, словаря терминов и определений, а также социальных и юридических аспектов применения биометрических технологий. Так, ГОСТ Р ИСО/МЭК 19785 определяет основную структуру записи биометрической информации (ЗБИ) и данных о дате регистрации, об истечении срока их хранения, данные о кодировании и т. д. [4].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 19784-1-2007 устанавливает программный интерфейс приложения (ПИП) и интерфейс поставщика услуги (ИПУ) в качестве стандартных интерфейсов биометрической системы, позволяющих создавать систему, используя компоненты, изготовленные различными изготовителями, и лежит в основе сервисов биометрических технологий [5].

ГОСТ ИСО/МЭК 19794-1-2015 устанавливает общие требования к структуре форматов обмена биометрическими данными и к их наименованиям, уровням и типам обработки, а также подходам к использованию записей и схемам кодирования [6].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-5-2013 регламентирует формат записей для хранения и передачи, условия получения и фотографирования изображений лица, характеристики цифровых изображений, методы организации снятия биометрии лица [7].

ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1-2007 регулирует проведение эксплуатационных испытаний и проверку полученных данных в соответствии установленных требований [8].

Данные и другие стандарты, удовлетворяющие требованиям ЕСФОБД, обеспечивают обмен биометрическими данными в рамках одной и между различными системами, комфортное и качественное использование продукта.

Далее рассмотрим и проанализируем, как влияет внедрение Face ID связано с применением технологий бережливого производства на предприятиях.

Бережливое производство (от англ. *lean manufacturing*) — методология, в основе которой лежит идея устранения потерь и оптимизации процесса производства [9].

В бережливом производстве одной из ключевых задач является обеспечение потока создания ценности и выявление и устранение потерь в нем.

Рассмотрим, как применение технологии Face ID помогает сокращать время протекания процессов и устраняет потерю «Ожидание».

Каждый день работники предприятия проходят через контрольно-пропускные пункты (время прохода составляет 4 секунды). Время прохода увеличивается из-за поиска и предъявления пропуска и не исключает ошибку (пропуск не может быть предъявлен), что создает очереди и ожидание выписки письменного пропуска (среднее время ожидания 5–7 минут). В данном случае система Face ID может обеспечить защиту от ошибки (пропуск не может быть предъявлен), а также от ошибки предъявления чужого пропуска.

Актуальным является применение Face ID для защиты от ошибок при доступе на территорию дошкольных и школьных учреждений, где на сегодняшний день не имеется достаточной степени защиты от проникновения посторонних лиц.

Для обеспечения безопасности в местах с высоким трафиком (вокзалы, аэропорты) применение Face ID в процессе сравнения входящих людей с портретами людей, числящихся в розыске, существенно ускорит процесс поиска человека по картотеке и обеспечит защиту от ошибки пользования чужими документами.

Также технология может применяться для защиты от ошибок при доступе к информации ограниченного пользования, либо обеспечению идентификации личности при проведении процедур, влияющих на безопасность и качество продукции и процессов. Например, внесение данных о качестве в режиме реального времени авторизованным по исследуемой технологии, либо по отпечатку пальца оператором сможет устранить двойную работу по подтверждению подписями на бумажном носителе и устранил риск подделки (защита от ошибок).

Таким образом, функция распознавания лиц, при создании которой соблюдены стандарты ЕСФБД, обеспечивает безопасное и качественное использование в разных отраслях жизни общества и рекомендуется для устранения потерь в производственных и бизнес-процессах.

### Список литературы

1. Что такое технологии Face ID и Liveness и как их используют в мобильных приложениях [Электронный ресурс]. — URL: <https://vc.ru/u/624770-vitaliy-vinogradov/317334-cto-takoe-tehnologii-face-id-i-liveness-i-kak-ih-ispolzuyut-v-mobilnyh-prilozheniyah?ysclid=l2gjz25fr5> (дата обращения 27.04.2022).
2. Сведения о передовой технологии Face ID [Электронный ресурс]. — URL: <https://support.apple.com/ru-ru/HT208108> (дата обращения 27.04.2022).
3. Face Pay Метро Москвы [Электронный ресурс]. — URL: <https://facepay.mosmetro.ru/> (дата обращения 27.04.2022).
4. ГОСТ Р 58293–2018 (ИСО/МЭК 19785–1:2015) Биометрия. Единая структура форматов обмена биометрическими данными. Часть 1. Спецификация элементов данных [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161701> (дата обращения: 28.04.2022).
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19784-1-2007 Идентификация Биометрическая. Биометрический программный интерфейс. Часть 1. Спецификация биометрического программного интерфейса [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067412> (дата обращения: 28.04.2022).
6. ГОСТ ИСО/МЭК 19794-1-2015 Информационные технологии Биометрия. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 1. Структура. [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200129505> (дата обращения: 28.04.2022).
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19794-5-2013 Информационные технологии Биометрия. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 5. Данные изображения лица [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108287> (дата обращения: 28.04.2022).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19795-1-2007 Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067413> (дата обращения: 28.04.2022).

9. Бережливое Производство: Как Достичь Совершенства, Сокращая Ненужные Действия [Электронный ресурс]. — URL: <https://blog.ganttpro.com/ru/berezhlivoe-proizvodstvo-lean/?ysclid=12i0gsvfi8> (дата обращения 27.04.2022).

## СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

О.А. ИВАНОВ

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные компоненты системы дистанционного контроля промышленной безопасности на объектах газотранспортной системы, особенности её формирования

**Ключевые слова:** дистанционный контроль, промышленная безопасность, объекты газотранспортной системы, опасные производственные объекты.

Газотранспортная система (далее — ГТС) — это совокупность газопроводов и сооружений, обеспечивающая транспортировку и распределение природного газа от места добычи к местам его потребления. Газопроводы высокого давления, газокompрессорные станции и газораспределительные станции в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 №116-ФЗ относятся к опасным производственным объектам (далее — ОПО) и требуют особого контроля при их эксплуатации.

Для обеспечения контроль за состоянием ОПО необходимо использовать интегральный показатель, рассчитывающийся с учетом всех факторов эксплуатации объекта, а для предотвращения опасных ситуаций, требуется проводить прогнозирование изменения данного показателя.

### **Архитектура СДК ОПО**

СДК ОПО представляет собой комплекс программных и программно-аппаратных средств, обеспечивающих непрерывное получение, обработку и передачу информации о значениях параметров технологических процессов и процессов обеспечения функционирования опасного производственного объекта, определяющих его безопасность.

Основная задача СДК ОПО — оперативная оценка рисков и прогнозирование возможности возникновения опасных ситуаций на основе аналитической обработки информации о контролируемых параметрах объектов наблюдения, делящаяся на два информационных блока (табл. 1):

**Информационные блоки системы**

<b>Документарный блок информации</b>	<b>Блок данных реального и псевдореального времени</b>
Электронная библиотека НТД	Система обработки данных реального времени
Система паспортизации оборудования	Электронный журнал диспетчера
Система учета эксплуатационных характеристик и ремонтов оборудования	
Электронный журнал событий	
Электронный журнал учёта целевых проверок	
Система управления персоналом	

**Электронная библиотека НТД**

Соблюдение требований нормативно-технической документации — это основа обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов. Следовательно, учёт и поддержание актуальности НТД это важный шаг к повышению уровня контроля на всех уровнях.

Для учёта НТД требуется реализовать электронную библиотеку, которая выполняет следующие функции: ведение картотеки документов с указанием характеристик документа (Статус документа, Срок действия, Преемственность); категорирование документов по уровням (Нормативно-правовые документы, Нормативные документы, Организационно-распорядительные документы, Эксплуатационная документация); согласование и утверждение документов; формирование перечня требований, на основе пунктов НТД.

**Система паспортизации оборудования**

Основой для СДК ОПО является создание электронной базы паспортизации оборудования. Паспортизация — это информация об оборудовании, эксплуатирующем на предприятии с описанием его иерархии и технических характеристик.

Основные функции системы паспортизации оборудования: ведение нормативно-справочной информации для паспортизации (Группа оборудования, Тип, Марка, Завод-изготовитель); ведение картотеки оборудования; учёт движение оборудования (Перемещение, Списание, Резерв).

Формирование базы паспортизации оборудование — это длительный процесс, но без проведения полного описания структуры предприятия, переход на цифровые методы контроля не возможен.

**Система учета эксплуатационных характеристик и ремонтов оборудования**

Важным критерием при оценки технического состояния объекта является учёт его эксплуатационных характеристик, показатели которых позволяют оценить необходимость проведения на объекте диагностических обследований, а при необходимости проводить планирование и учитывать ремонты.

Система планирования ремонтов обеспечивает формирование планов следующими способами: от наработки оборудования, по регламенту проведения, с учетом технического состояния или ручное включение в план.

Информация о запланированном и проведённом на объекте диагностическом обследовании (его результатах), техническом обслуживании или ремонте (далее — ДО, ТО и Р) математически оценивается и предоставляется для расчёта интегрального показателя.

#### **Электронный журнал событий**

Электронный журнал событий позволяет фиксировать нештатные события (Отказ, Авария, Нарушения требования НТД, Инцидент, Дефект, Несчастный случай) выявленные при эксплуатации производственных объектов.

Основные функции электронного журнала событий: регистрация и классификация выявленного несоответствия; определение ответственного за устранение; определение веса события и влияния его производственный процесс; планирование работ по устранению; привлечение к устранению сопричастных подразделений; отражение причин возникновения; включения работ в долгосрочные планы ДО, ТО и Р.

Результат обработки несоответствия оценивается математически с учетом значимости уровня технического устройства, веса события и способа его устранения, результаты расчёта участвуют в вычислении интегрального показателя.

#### **Электронный журнал учёта целевых проверок**

Электронный журнал учёта целевых проверок предоставляет возможности для проведения проверок различных объектов, документации, знаний и навыков персонала на основе проверочных листов, формируемых согласно требованиям НТД. Позиции проверочного листа определяются согласно электронной библиотеке НТД и группе объекта, на котором проводится проверка.

Основные функции электронного журнала учёта целевых проверок: ведение плана проверок; ведение комиссий для проведения проверок и их состава; формирование проверочных листов (чек-лист); формирование маршрута проверки оборудования; регистрация выявленных нарушений в электронном журнале событий.

Использование электронного журнала учёта проверок обосновано тем, что трактовка правил НТД проверяющим может быть субъективной, для исключения данного факта пункты проверочного листа формируются автоматически с учётом сформулированных и утвержденных требований, группы оборудования и их технических характеристик.

#### **Электронный журнал диспетчера**

Электронный журнал диспетчера предназначен для ведения, агрегирования и предоставления информации о показателях транспортировки газа.

Основные функции электронного журнала диспетчера: отображение информации, поступающей автоматизированным способом из систем реального времени; ручной ввод, корректировка и подтверждение оперативной информации; передача отчётной подтвержденной информации заинтересованным участникам процесса транспортировки газа.

Математический аппарат позволяет оценивать состояния и предпосылки нештатных ситуаций эксплуатируемых объектов с учетом получаемой информации о показателях транспортировки газа, их корреляции и уставок, определённых экспертной группой.

### Система управления персоналом

Система управления персоналом предоставляет информацию о работниках общества для формирования комиссий внутренних проверок, а также информацию об образовании, категории работника и его аттестации.

Информации о штатной структуре предприятия используется для определения ответственных подразделений за оборудование.

### Система обработки данных реального времени

Система обработки данных реального времени получает информацию с автоматизированных систем управления технологическим процессом (далее — АСУ ТП) и предоставляет в математический аппарат СДК ОПО для расчёта интегрального показателя без участия человека. Данный способ предоставления информации о состоянии объекта может содержать данные, некорректно отражающие ситуацию на объекте по ряду причин: ложное срабатывание или повреждение датчиков систем автоматизированного управления (далее — САУ); проведение регламентных работ по проверке САУ; отсутствие прописанных правил корреляции и уставок.

Учитывая описанное выше, требуется определить вес значимости данных реального времени и учитывать уровень достоверности при расчёте интеграционного показателя.

### Взаимосвязи систем в архитектуре СДК ОПО

Схема взаимодействия систем представлена на рис. 1. Данная схема является логической, то есть при реализации, некоторые системы могут быть реализованы на одной платформе.

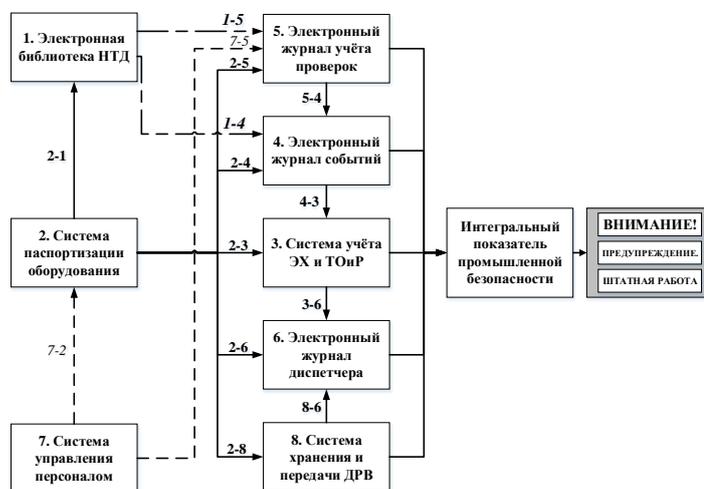


Рис. 1. Описание потоком между системами.

Описание потоков информации представлено в табл. 2.

Таблица 2

### Потоки информации в системе

№	Система источник	Система приёмник	Описания потока информации
2-1	Система паспортизации оборудования	Электронная библиотека НТД	Нормативно-справочная информация для формирования требований чек-листа Информация о технических характеристиках оборудования

2-3	Система паспортизации оборудования	Система учёта ЭХ и ТОиР	Информация объекте и его технических характеристиках Информация о регламентах проведения ТОиР Нормативы по расходам, наработке, комплектации и др.
2-4	Система паспортизации оборудования	Электронный журнал событий	Информация объекте и его технических характеристиках Информация об эксплуатирующем подразделении
1-4	Электронная библиотека НТД	Электронный журнал событий	Правила, нормативы, требования по эксплуатации производственных объектов Весовые коэффициенты событий
1-5	Электронная библиотека НТД	Электронный журнал учёта проверок	Требования к оборудованию, документации и персоналу для формирования оценочных листов
2-5	Система паспортизации оборудования	Электронный журнал учёта проверок	Информация объекте и его технических характеристиках Информация о размещении объекта
7-2	Система управления персоналом	Система паспортизации оборудования	Ответственный за эксплуатацию оборудования подразделения или работник
7-5	Система управления персоналом	Электронный журнал учёта проверок	Информация о категории и аттестации работников проверяемого подразделения Состав комиссии для проведения проверки
5-4	Электронный журнал учёта проверок	Электронный журнал событий	Выявленные при проведении проверки несоответствия
4-3	Электронный журнал событий	Система учёта ЭХ и ТОиР	Несоответствия, устранение которых требует долгосрочного планирования с привлечением дополнительного финансирования (План капитального ремонта, План реконструкции)
2-6	Система паспортизации оборудования	Электронный журнал диспетчера	Информация объекте и его технических характеристиках
3-6	Система учёта ЭХ и ТОиР	Электронный журнал диспетчера	Информация о запланированных ДО, ТОиР
2-8	Система паспортизации оборудования	Система хранения и передачи ДРВ	Информация объекте и его технических характеристиках
8-6	Система хранения и передачи ДРВ	Электронный журнал диспетчера	Оперативная информация с АСУ ТП

Информация об эксплуатации опасных производственных объектов, проводимых на них ДО, ТОиР, результаты проверок разного уровня, оперативные данные с АСУ ТП, предоставляют возможность рассчитать интегральный показатель промышленной безопасности, который при положительном значении, позволит избежать дополнительных проверок контролирующих органов разного уровня, а в случае реализации системы оценки рисков и прогнозирования данного показателя, позволит ответственным за эксплуатацию ОПО заранее принимать меры по предотвращению опасных ситуаций.

### Список литературы

1. СТО Газпром 18000.1-001-2021. Единая система управления производственной безопасностью. СПб.: 2021. 286 с.
2. Федеральный закон [принят Государственной Думой 20 июня 1997 года] № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
3. <https://ru.wiktionary.org/>. Статья «Опасный производственный объект». Дата обращения 10.02.2022.
4. <https://www.gazprom.com/about/production/safety/>. Дата посещения 10.02.2022.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА КАК ОСНОВЫ ДЛЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.Д. Кокоулин, Н.Ю. Недосекина

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены преимущества процессного подхода, возможные перспективы применения и более широкого распространения в деятельности предприятий, нацеленных на цифровизацию.

**Ключевые слова:** *процессный подход, цифровизация, процесс, экономика, предприятия, эффективность, управление.*

### **Актуальность**

Широкое влияние цифровизации на все сферы жизни современного человека давно стало реальностью. Применение цифровых технологий на предприятии трансформирует как внешнюю среду организации в плане условий взаимодействия с государством, поставщиками и потребителями, так и внутренние процессы, протекающие в компании, а именно, в области управления. Цифровизация играет важную роль в преобразовании бизнес-процессов, которые должны быть структурированы и хорошо регламентированы. Процессный подход, рассматривающий деятельность компании как процесс, оптимален для получения конкурентного преимущества в условиях цифровой экономики за счет формирования механизмов экономической надежности — совокупности способов и методов эффективного взаимодействия всех ресурсов промышленного предприятия.

### **Основная часть**

Любая организация ведет регулярную текущую деятельность. Эта деятельность представлена процессами. Согласно стандарту, ISO 9001-2015: процесс — совокупность взаимосвязанных и (или) взаимодействующих видов деятельности, использующих входы для получения намеченного результата (выхода). Процессный подход — подход к организации и анализу деятельности компании, который основан на выделении и рассмотрении ее бизнес-процессов, каждый из которых протекает во взаимосвязи с другими.

Структурно организации обычно разделены по функциям: каждый отдел отвечает за определённую задачу. Кроме того, в некоторых из них функциональные отделы действуют и живут как отдельные суб-организации внутри большой. Процессы же происходят, затрагивая не одну, а сразу несколько функций, поэтому для конечного результата важно работать именно с ними. В этом случае результат будет замечен не только для внешнего потребителя, но и для внутреннего. Помимо этого, развитие организационной культуры предприятия достигается на основе процессного взаимодействия.

Анализ и оптимизация взаимосвязанных процессов как системы повышают результативность и эффективность организации, дают возможность достичь поставленные цели в срок. Процессный подход позволяет управлять взаимосвязями и взаимозависимостями между процессами системы, благодаря чему общие результаты деятельности организации могут быть улучшены.

С позиций процессного подхода основными направлениями стратегического развития предприятий являются организационно-экономическое (реинжиниринг, инжиниринг), производственно-техническое (новые технологии, модернизация) и продуктовое (диверсификация, новая продукция и совершенствование существующей продукции).

Однако внедрение процессного подхода в России связано с комплексом проблем различного характера:

**1. Проблема оценки результата.** Многие руководители ждут от проектов по внедрению процессного подхода быстрых и конкретных результатов, например, мгновенного увеличения чистой прибыли. Но данный процесс носит длительный характер и может занять несколько лет, а на результаты деятельности влияют и многие другие факторы.

**2. Проблема монополизма.** Для российской экономики характерны различные формы монополизма, поэтому многие предприятия не заинтересованы в улучшении качества продукции и снижении цен и, как следствие, во внедрении процессного подхода.

**3. Проблема целеполагания.** Зачастую руководители ставят перед своими подчиненными либо нечеткие, либо вовсе не корректные цели по внедрению процессного подхода.

**4. Проблемы управления.** Руководители в своем большинстве не обладают достаточным уровнем квалификации для перехода к процессному управлению и в целом отрицательно относятся к подобным изменениям внутри организации. Как правило, они перепоручают подготовку проекта ИТ-отделу, оторванному от реального положения дел в компании, который не в силах составить корректную карту процессов. К тому же владелец процесса заинтересован в его результате и, как следствие, может рассчитывать на долю прибыли, но собственники не стремятся допустить подчиненных к распределению прибыли.

**5. Проблемы методик и моделирования.** Зачастую на предприятии отсутствуют стандарты по описанию и регламентированию бизнес-процессов, а построенные модели попросту не работают. Выбрать же эффективную методику и инструменты совершенствования процессов достаточно сложно. Иногда предприятие стремится охватить все процессы разом и в итоге испытывает трудности с ресурсами и управлением столь глобальным проектом.

В качестве отраслевых лидеров, находящиеся в процессе реализации стратегии цифровой трансформации, можно выделить банковский сектор и финансовые услуги, ИТ и разработку ПО, а также промышленное производство. Отрасли, в рамках которых цифровизация развивается хуже всего, — это сфера услуг бизнесу (обслуживание и сопровождение), строительство.

Менеджмент предприятий в условиях современного цифрового экономического уклада должен своевременно реагировать на изменения во внешней среде, выстраиваться с учетом прозрачности и структурированности всех бизнес-процессов, применять эффективную систему управления знаниями и мотивации персонала, а также учитывать разнообразные особенности управления предприятием в условиях цифровизации. При внедрении в деятельность предприятия, цифровые технологии дают ряд преимуществ, среди которых можно выделить повышение гибкости производства за счет проактивного изменения характеристик производственного процесса и обеспечение информационной интеграции этапов жизненного цикла производимой продукции.

Цифровая трансформация дает качественное улучшение бизнес-процессов предприятия благодаря внедрению инноваций и адаптации бизнес-моделей к условиям современной цифровой экономики.

Однако стоит отметить повышение уровня зависимости производства от используемых цифровых технологий. Необходимо предъявлять особые требования к цифровым технологиям и учитывать возможный ущерб от сбоя интегрированных цифровых систем, так как он будет более существенным по сравнению с традиционной моделью управления производственными процессами предприятия. Кроме того, основное препятствие на пути к цифровизации, с которым сталкиваются компании, — это недостаточная зрелость текущих бизнес-процессов. Для достижения значимого результата необходимо рассматривать сквозные бизнес-процессы и вовлекать бизнес-подразделения. Именно поэтому так важно подготовиться к использованию на предприятии нового ПО с помощью внедрения и процессного подхода.

### **Заключение**

Подводя итог, можно отметить, что применение современных технологий в управлении отражается на деятельности всего предприятия, поэтому крайне необходимо учитывать связанные с этим риски. Получение ожидаемых показателей эффективности возможно только при тщательном планировании, глубокой и всесторонней проработке перспективных технологий, их положительных и отрицательных эффектов, что невозможно без использования процессного подхода. В следствии этого, управление промышленным предприятием в эпоху цифровизации накладывает на руководителя организации широкий спектр требований к профессиональным знаниям, умениям и навыкам как в области менеджмента, управления персоналом, так и в области IT-технологий.

### **Список литературы**

1. Яковлева Е. В., Терентьева А. Р. Экономическая надежность технологического развития // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. 2021.
2. Караваева Е.Д. Управление организацией в условиях цифровизации: учебное пособие. — СПб.: Научно-емкие технологии, 2020.
3. Аксянов А., Сорокина А. Проблемы внедрения процессного подхода к управлению предприятием.
4. ГОСТ Р ИСО 9001-2015.

## **ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННО-КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ**

А.В. ЛОГАЧЕВА, Ю.И. МИХАЙЛОВ

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности управления качеством при производстве электронно-компонентной базы, разобраны ключевые проблемы, с которыми сталкиваются организации при производстве электронно-компонентной базы.

**Ключевые слова:** электронно-компонентная база, управление качеством, показатели качества электронно-компонентной базы.

Для того чтобы дать оценку качества продукции, нужно сравнить набор свойств с каким-то эталоном. Эталон могут быть лучшие образцы, требования, закрепленные в стандартах или технических условиях. Но любой эталон или документ узаконивает определенный набор свойств и характеристик лишь на какой-то период времени, а потребности непрерывно меняются, поэтому предприятие, изготавливая продукцию даже в точном соответствии с нормативно-технической документацией, рискует выпускать её некачественной. Таким образом, основное место в оценке качества продукции или услуг отводится потребителю.

Чтобы оценить качество продукции используются различные показатели, которые представляют собой количественные характеристики одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество и рассматриваемые применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления [2]. Наиболее широко в практике оценки уровня качества электронно-компонентной базы используются единичные показатели, поскольку они легко поддаются сравнению и контролю.

**Электронная компонентная база (ЭКБ)** — это совокупность изделий электронной техники, квантовой электроники и/или электротехнических изделий, представляющих собой сборочную единицу или их совокупность, обладающих конструктивной целостностью, принцип действия которых основан на электрофизических, электрохимических, электромеханических, фотоэлектронных и/или электронно-оптических процессах и явлениях, не подвергаемых изменениям в процессе применения при создании образцов радиоэлектронной аппаратуры, в которых они применяются, изготавливаемых по самостоятельным комплектам конструкторской и технологической документации, выполняющих функции генерирования, преобразования, переключения, задержки, распределения, запоминания, передачи и фильтрации радиочастотных и электрических сигналов, и не подлежащих восстановлению или ремонту (далее — электрорадиоизделия), а также электронных модулей нулевого уровня, представляющих собой совокупность электрически соединенных электрорадиоизделий, образующих функционально и конструктивно законченные сборочные единицы, предназначенные для реализации функций приема, обработки, преобразования, хранения и/или передачи информации или формирования (преобразования) энергии, выполненные на основе несущих конструкций или размещенных на общей подложке, обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости и рассматриваемые как единое целое с точки зрения требований к разработке, производству, приемке, поставке и эксплуатации [4].

К показателям качества ЭКБ [3] относятся следующие.

1. Показатели назначения (электрические характеристики, время задержки, максимальная температура кристалла, частотные характеристики и т.д.).
2. Показатели надежности (интенсивность отказов, наработка, гамма процентный срок сохраняемости).
3. Показатели экономного использования энергии (потребляемая мощность, потребляемый ток).
4. Показатели технологичности (выход годных изделий, трудоемкость изготовления и др.).
5. Показатели стандартизации и унификации (коэффициент применяемости конструкции).

6. Показатели патентно-правовые (показатель патентной защиты, показатель патентной чистоты).
7. Показатели объемно-весовые (объем, масса и др.).
8. Показатели стойкости к внешним воздействующим факторам (повышенная рабочая температура, пониженная рабочая температура и др.).

Основными показателями качества ЭКБ, определяющих их пригодность, являются электрические параметры. После изготовления ЭКБ подвергается контролю на соответствие требованиям конструкторской документации и технических условий. Из-за сложности технологических процессов, состоящих из нескольких десятков различных операций и переходов, несовершенства и нестабильности отдельных технологических операций, обуславливающих невоспроизводимость и разброс параметров изготавливаемых структур, вследствие действия случайных факторов, каждый из контролируемых электрических параметров будет иметь некоторый разброс значений [1].

Эти факторы, в особенности нестабильность свойств материалов и влияние случайных воздействий вызывают определенные проблемы в области управления качеством и накладывают дополнительные особенности. Поэтому с целью обнаружения дефектов и устранения дефектных структур из последующего цикла изготовления, а также для проверки соответствия изготовленной ЭКБ требованиям технических условий процессы разработки, изготовления и применения ЭКБ сопровождаются большим количеством контрольных и измерительных операций. Контрольные операции можно подразделить:

- на производственный контроль качества, целью которого является определение явных дефектов, характеризующих процент выхода годных изделий, и определение скрытых дефектов, характеризующих надежность;
- на функциональный контроль ЭКБ, заключающийся в контроле корректности выходных сигналов в зависимости от входных возмущений;
- на параметрический контроль, задача которого состоит в проверке соответствия электрических параметров заявленным в технической документации.

Таким образом, при производстве ЭКБ основные показатели качества — электрические параметры формируются на финальных стадиях изготовления, но их номинальные значения задаются при проектировании, а разброс фактических значений от номинальных является следствием нестабильности свойств исходных материалов и технологического процесса. Поэтому особое внимание на всех этапах создания ЭКБ должно отводиться техническому контролю. Объектом технического контроля могут быть изделия, процессы их создания, применения, транспортировки, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующая нормативно-техническая документация.

### Список литературы

1. Качество и надежность электронной компонентной базы ЭВМ специального назначения: учебное пособие / В. И. Иевлев, Г. А. Филиппов. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 102 с.
2. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1).
3. ГОСТ 4.465-87 Система показателей качества продукции (СПКП). Микросхемы интегральные. Номенклатура показателей.
4. ГОСТ Р 58857-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Ракетно-космическая техника. Электронная компонентная база. Общие положения.

## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В РАМКАХ ПРОЕКТА «НАЦИОНАЛЬНЫЕ ЦЕЛИ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»

А.Д. Кокоулин, Н.Ю. Недосекина

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

**Аннотация.** В статье рассмотрены различия между понятиями цифровизации и цифровой трансформации, описаны ключевые области бизнеса, которые затрагивает цифровая трансформация, выявлены достоинства цифровой трансформации и проблемы, которые могут возникнуть при её реализации.

**Ключевые слова:** *цифровая трансформация, цифровизация, организация, компания, бизнес, цели, развитие*

В июле 2020 года президентом РФ был подписан указ о национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года [4]. Одной из целей стала цифровая трансформация (далее — ЦТ). Но многие до сих пор не понимают значение данного понятия, необходимость внедрения и достоинства ЦТ. Так что же такое цифровая трансформации? Переход к использованию цифровых технологий? Изменение бизнес-процессов, связанное с цифровизацией? Цифровая трансформация равносильна цифровизации? Попробуем разобраться.

Часто приравнивают термин ЦТ к цифровизации, но стоит разграничить два этих, на первый взгляд, схожих понятия. Цифровизация является лишь предшествующим ЦТ уровнем изменений, а запускает весь процесс оцифровка. И так, сначала происходит оцифровка информации — это перевод процессов в digital-формат (цифровая форма хранения информации). Далее происходит цифровизация — внедрение цифровых технологий в разные сферы жизни, здесь переведенные в digital-формат данные и процессы уже можно использовать для упрощения и оптимизации операций. И лишь после этого можно говорить о переходе к цифровой трансформации, ведь это более глубокий и масштабный процесс. Это комплексное преобразование предприятия с использованием цифровых решений и технологий. Цель — выход на новые рынки, создание новых каналов продаж и решений, которые генерируют новую чистую выручку и приводят к увеличению стоимости компании. Главная задача — обеспечить жизнеспособность и рост компании на длительный период. Только глобально новые модели бизнеса выживают надолго. На этом этапе бизнес может создавать и запускать решения, интегрирующие все оцифрованные данные и приложения. Более того, трансформация открывает возможность для создания и реализации принципиально новых стратегий, которые приносят больше выгоды бизнесу и пользы клиентам [1].

Иными словами, цифровая трансформация — это усовершенствованный подход к организации работы сотрудников для выхода на новый уровень взаимодействия с клиентами с целью быстрее понять и проанализировать запрос клиента, что позволит в максимально короткие сроки выполнить запрос и предоставить результат заказчику, всё это выполняется за счёт использования современных технологий, анализа данных, оптимизации операций.

ЦТ охватывает три ключевых области бизнеса. Во-первых, трансформируются бизнес-процессы компании, они вынуждены адаптироваться в соответствии с преобразованием целей организации, новыми характеристиками рынка и изменёнными потребностями клиентов. Во-вторых, преобразуются бизнес-модели компании, они нацелены на перестройку рабочих процессов и областей бизнеса, которые связаны с новыми задачами. Трансформация бизнес-моделей направлена на основные элементы процесса создания ценности в конкретной отрасли. В-третьих, изменяется корпоративная культура компании. Изначально ЦТ должна соответствовать ценностям членов коллектива организации, поэтому важно перед началом ЦТ донести сотрудникам, что данные изменения улучшат работу не только всей организации, но и каждого её работника, что работать станет комфортнее, а поставленные задачи можно будет решить за более короткий срок.

Цифровая трансформация необходима не только бизнесу, но и сферам здравоохранения, образования, государственного управления, ведь задачи ЦТ актуальны для любых отраслей. Для успешной реализации ЦТ необходимо повышать уровень «цифровой зрелости» организаций (под цифровой зрелостью подразумевается совокупная оценка развития компании по трём областям, описанным выше), увеличивать процент массовых социально-значимых услуг, которые были бы доступны в электронном виде, обеспечить возможность широкополосного доступа к сети «Интернет» практически всем домохозяйствам страны, вкладываться преимущественно в отечественные решения в сфере информационных технологий.

Преимуществами ЦТ являются: повышение эффективности и продуктивности рабочих процессов; улучшение процесса взаимодействия с клиентами; внедрение инноваций в бизнес-модели; возможность обратить внимание на потенциально новый продукт или услугу; выработка устойчивости организации во время кризисов; поддержка конкурентоспособности; новые стратегии развития компании, дающие возможность увеличить рентабельность и укрепить каналы получения выручки. Поставим себя на место клиента. Каждый день мы пользуемся огромным количеством приложений, сайтов, продуктов, которые появились в результате ЦТ. Это очень удобно, доступно и выгодно. Мы настолько часто пользуемся результатами ЦТ, что перестали удивляться появившимся возможностям. Это говорит о том, что запросы клиентов меняются, и компаниям нужно этому соответствовать.

При реализации ЦТ организация может столкнуться с рядом проблем. Например, утечка информации о клиентах и работниках. Чем больше компаний переносят свои данные в цифровую среду, тем более развитой должна быть информационная безопасность и защита данных. Возможно, на предприятии отсутствуют квалифицированные кадры, которые смогли бы правильно провести ЦТ. Тогда перед запуском проекта ЦТ нужно будет обучить сотрудников. Самой главной ошибкой является установка слишком коротких сроков, ЦТ — это длительный процесс, требующий предварительной подготовки, реализовывать ЦТ нужно поэтапно.

Также есть вероятность, что проект по внедрению ЦТ на предприятии провалится, проблемой может послужить плохое планирование реализации проекта, пробелы в коммуникации с сотрудниками (так как многие организации не задумываются о важности донесения актуальности ЦТ сотрудникам низшего звена, что в свою очередь не вызывает интерес сотрудников к изменениям, что может надолго застопорить процесс ЦТ), отсутствие должного контроля за протеканием процесса реализации. Получается,

что проект по ЦТ организации всегда нужно начинать с изменения корпоративной культуры, при этом важность перехода к ЦТ нужно донести ещё и клиентам, а при необходимости и внешним партнёрам организации.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что цифровая трансформация является важным и необходимым процессом для организаций всех сфер общества. Прогресс не стоит на месте, вместе с ним появляются новые запросы и задачи, которые должна решать ЦТ. При реализации проекта ЦТ нужно учесть все проблемы, которые могут возникнуть, и заранее предусмотреть пути их решения.

### Список литературы

1. «Как отличить цифровую трансформацию от цифровизации» // URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/cmrm/60bae4c49a794754627d6161> // Дата обращения: 27.04.2022.
2. «Что такое цифровая трансформация?» // URL: <https://www.sap.com/cis/insights/what-is-digital-transformation.html> // Дата обращения: 27.04.2022.
3. «Зачем нужна цифровая трансформация?» // URL: [https://probusiness.io/special\\_project/7950-kak-stroit-effektivnyu-biznes-na-gody-razbiraemysya-zachem-nuzhna-cifrovaya-transformaciya.html](https://probusiness.io/special_project/7950-kak-stroit-effektivnyu-biznes-na-gody-razbiraemysya-zachem-nuzhna-cifrovaya-transformaciya.html) // Дата обращения: 28.04.2022.
4. «Указ президента Российской Федерации от 21.07.2020г.» // URL: [https://www.ru-ikt.ru/upload/iblock/49b/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-21.07.2020-\\_474-O-natsionalnykh-tselyakh-razvitiya-Rossiyskoy-Federatsii-na-period-do-2030-goda.pdf](https://www.ru-ikt.ru/upload/iblock/49b/Ukaz-Prezidenta-RF-ot-21.07.2020-_474-O-natsionalnykh-tselyakh-razvitiya-Rossiyskoy-Federatsii-na-period-do-2030-goda.pdf) // Дата обращения: 26.04.2022.

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ВЕБ-ПЛАТФОРМЫ ДОСТИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА

М.А. ПИКУЛЬ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)*

**Аннотация.** В данной работе поставлена проблема о низкоквалифицированных и малоопытных работников, которые могут повлечь к некорректному поиску и установлению подлинности документов. Во внимание берутся такие документы как сертификаты, дипломы и другие достижения человека. Решения данной проблемы — разработка веб-платформы достижений человека.

**Ключевые слова:** веб-платформа, госуслуги, достижения человека, сервис, пандемия, веб-технологии

Сегодня в условиях постоянно меняющегося рынка в связи с пандемией, наблюдается текучесть кадров, что приводит к последующему приему сотрудников, которые имеют недостаточную квалификацию и опыт работы [1]. Данная проблема приводит к снижению производительности, к тратам на переобучение сотрудников.

Недостаточно квалифицированные и неопытные сотрудники могут повлечь некорректное предоставление таких услуг как: поиск документов и установление их подлинности. С такой проблемой как правило сталкиваются люди при подаче на рассмотрение своих портфолио и резюме. Неопытный, либо неквалифицированный сотрудник по неосторожности и невнимательности может не взять во внимание предоставленный человеком сертификат, либо диплом, так как не удостоверился в его подлинности. На рынке небыли найдены аналоги, которые бы решили данную проблему. Поставлена задача: решить данную проблему путем создания веб-платформы достижений человека.

Веб-платформа достижений человека представляет собой систему, в которой хранятся документы подтверждающие заслуги и достижения каждого человека. Внесение в систему

всех сертификатов, дипломов и прочих заслуг людей в спорте, научной деятельности, музыке и прочее, производится соответствующими организациями, которые проводят определенный конкурс либо мероприятие и закрепляются за заранее зарегистрировавшимся участником. Пользователю (участнику) не нужно будет искать все свои сертификаты и дипломы, и прикреплять их к портфолио или резюме, а достаточно добавить ссылку на свою страницу, где вынесены по разделам («Научная деятельность», «Спорт», «Музыка» и прочее) подтвержденные, зарегистрированные организаторами документы.

Для разработки веб-платформы достижений человека, принято использовать следующие инструменты. Видимый для пользователя интерфейс решено реализовать с помощью двух технологий, таких как: HTML и CSS [2]. Для формирования клиентской части приложения решено использовать язык программирования JavaScript и его фреймворк Svelte [3]. Данный набор инструментов имеет подходящий для данной системы набор библиотек и позволит организовать безопасное хранение и передачу данных.

Для реализации логики работы сайта выбран язык программирования TypeScript, а также платформа Nodejs которая позволит использовать JavaScript, в том числе и TypeScript, для разработки серверных приложений [4].

На рисунке 1 изображен первичный вариант макета для данной веб-платформы, который планируется совершенствовать.

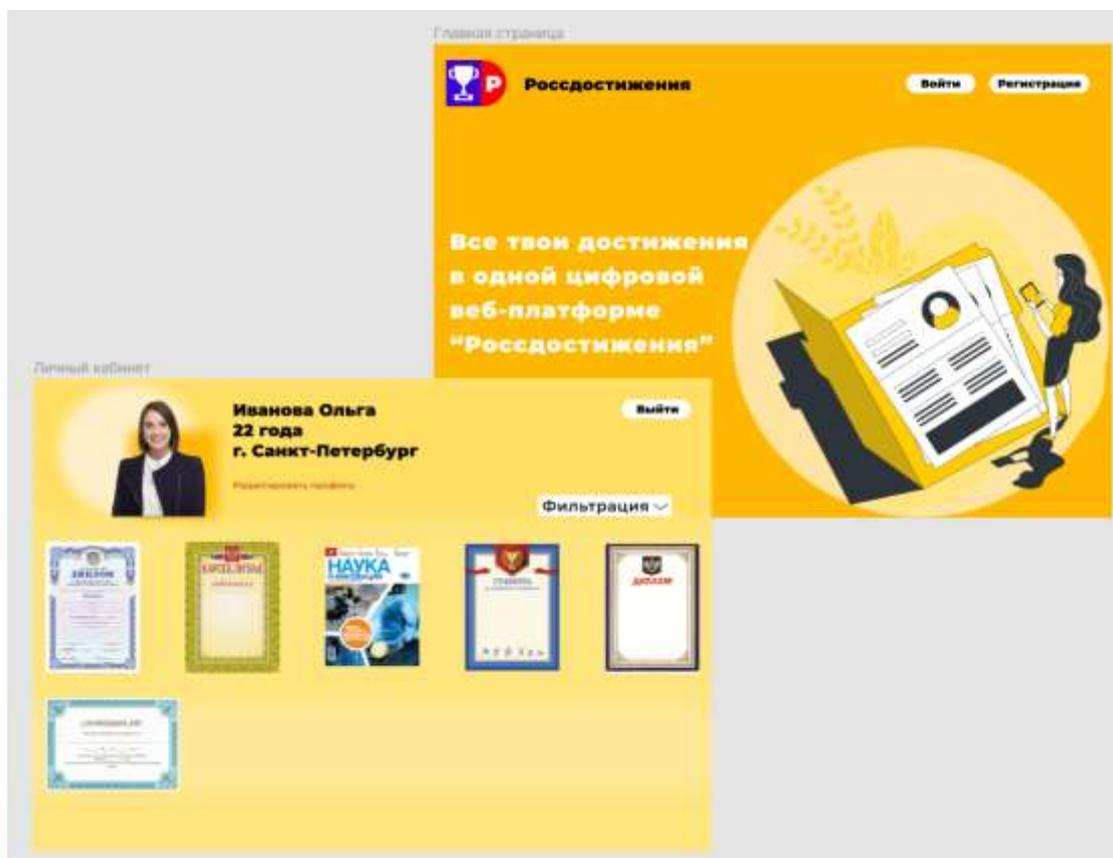


Рис. 1. Макет веб-платформы.

Рассмотрена проблема о низкоквалифицированных и малоопытных работниках предприятий. Проанализирован рынок на наличие аналогов по решению поставленной проблемы в сфере поиска и установления подлинности документов. Вынесена суть предлагаемого решения. Определены подходящие инструменты с помощью которых планируется реализовать идею. Возможно, в будущем данную идею можно будет объединить с порталом «Госуслуги», так как это единая точка доступа физических и юридических лиц к информации, которые предоставляются государственными учреждениями и уже хранит в себе базу персональных данных многих россиян.

### Список литературы

1. Проблема дефицита кадров: причины и пути их решения. URL: <https://www.kom-dir.ru/article/2537-defitsit-kadrov> (20.03.2022)
2. Что такое HTML и CSS. URL: <https://webref.ru/layout/learn-html-css/first-web-page> (20.03.2022)
3. Что такое JavaScript.  
URL: [https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/First\\_steps/What\\_is\\_JavaScript](https://developer.mozilla.org/ru/docs/Learn/JavaScript/First_steps/What_is_JavaScript) (20.03.2022)
4. What is TypeScript. URL: <https://www.typescriptlang.org/> (20.03.22)

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И АНАЛИЗ ЕГО СТРУКТУРЫ ДОХОДОВ ОТ ПЕРЕВОЗОК

В.И. ПОТОПАЕВ, Г.В. АСЕЕВ

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

**Аннотация:** в данной статье были рассмотрены перспективы развития и расширения метро Санкт-Петербурга — возможности и целесообразность этого в целом; было рассмотрено, как осуществляется обслуживание метрополитена в Санкт-Петербурге; поднят вопрос финансирования — насколько дорого бюджету города обходится содержание метрополитена; проведён анализ финансовых показателей и выявлена корреляция между ними, сделаны выводы о покрытии расходов собственными доходами от реализации видов деятельности метрополитена и тенденциях, влияющих на это.

**Ключевые слова:** метрополитен, метро, финансирование, город, транспорт, экономика

### Актуальность

В настоящее время наличие современной системы метрополитена в большом развивающемся городе или городской агломерации является не просто отличным дополнением к его транспортной инфраструктуре, а, скорее, даже представляет собой необходимую её часть, делая жизнь жителей города более комфортной и удобной, а функционирование города — более устойчивым [1].

### Основная часть

В создании и обеспечении работы метрополитена заинтересованы обе стороны: жители крупного города (или агломерации) и его администрация. Если первые нуждаются в безопасном, быстром и доступном транспорте для свободного перемещения, как в ближние, так и отдалённые части города, то вторые — в лице правительства города — получают преимущества в виде снижения трафика наземного транспорта, создания связи различных уже существующих видов транспорта между собой и расстановку приоритетов городской застройки.

Санкт-Петербургу, как второму по площади и численности населения городу России с высокой маятниковой миграцией, попросту необходима современная и развитая сеть метрополитена для удовлетворения нужд жителей.

*Обзор текущих недостатков системы общественного транспорта и перспектив развития петербургского метрополитена для их устранения*

К сожалению, в последние годы строительство новых станций метро в северной столице сильно замедлилось: начиная с 2018 года, в Петербурге было открыто всего 5 новых станций. Можно предположить, что такое малое количество станций было открыто за последние годы в связи с эпидемиологической ситуацией — немало финансов было затрачено на содержание и поддержание метрополитена в период с 2020 года по текущее время. Тем не менее, в Москве с 2018 года было открыто целых 44 новых станций, следовательно, перекладывать ответственность на пандемию вследствие медленного темпа развития петербургского метрополитена особого смысла нет.

В Санкт-Петербурге есть немало районов, где новые станции метро просто необходимы:

— Юг Кировского района и Красносельский район.

Станция «Проспект Ветеранов» является самой загруженной в городе — ежемесячно ей пользуются около 2.5 млн человек [2]. Правительство города пыталось решить проблему большой загруженности этого района при помощи наземного транспорта, но его стало настолько много, что в любое время дня Ленинский проспект «стоит», не говоря уже об утренних и вечерних часах.

— Красногвардейский и Калининский районы.

Транспортная инфраструктура этих районов, граничащих друг с другом на северо-востоке города, развита далеко не самым лучшим образом — движение по основным проспектам затруднено почти всё время. Верным решением могло бы стать прокладывание подземных путей, никак не упор на наземный транспорт, иначе может повториться такая же ситуация с загруженным трафиком наземного транспорта, как и на юго-западе города.

При обращении к исследованию комитета по транспорту и СПб ГКУ «Организатор перевозок» о самых популярных маршрутах наземного транспорта, по данным на ноябрь 2020 года, можно отметить, что из десяти попавших в список маршрутов, семь курсируют в вышеперечисленных районах и суммарно в день перевозят 182 600 человек [3]. Становится ясно, что без метрополитена некоторые районы города просто задыхаются и наземный транспорт не в состоянии справиться с большим пассажирским потоком — необходимы новые станции метро.

Несмотря на суровые для прокладывания линий метро географические условия Петербурга, постройка новых станций возможна, современные технологии позволяют осуществить это, однако эти технологии достаточно затратные в своей эксплуатации. Поэтому имеет смысл задаться вопросом, как осуществляется обслуживание метро и какие на это затрачиваются средства, насколько экономически эффективен метрополитен, способен ли он функционировать самостоятельно за счёт своих доходов? — ведь, возможно, что именно из-за высокой капиталоемкости не наблюдается открытие новых станций и активное развитие уже существующих линий метрополитена.

*Ключевые показатели структуры перевозки ГУП «Петербургский метрополитен»*

Одним из лучших вариантов для решения государством значительных общественных задач и дальнейшего поддержания их результата является создание юридического лица,

организационно-правовая форма которого — государственное унитарное предприятие (ГУП). Такие организации не наделены правом собственности на закрепленное за ними имущество и владеют им на праве хозяйственного ведения для получения прибыли в пользу государства и покрытия расходов предприятия. В случае, если был недополучен доход от реализации видов деятельности организации, государство компенсирует его в виде субсидий.

Наличие государственных дотаций и отсутствие необходимости «выходить в ноль» по финансовым результатам позволяет реализовывать перевозку горожан в ещё более комфортных для них условиях. Например, в число таких условий входят: право на получение льготного проездного билета для представителей различных социальных групп, сниженные тарифы для проезда по картам определенной платёжной системы или же возможность приобретения единых проездных билетов.

Остаётся вопрос: как дорого обходится содержание метрополитена для бюджета города? Вследствие того, что ГУП обязаны публиковать свои финансовые отчёты о своей деятельности, ответить на данный вопрос не составит большого труда. Однако возникает дополнительный интерес к выявлению корреляции между уровнем покрытия расходов доходами от реализации видов деятельности и различными финансовыми и фактическими показателями работы метрополитена.

Основными источниками информации для проведения анализа были взяты доклады об «Исполнении финансового плана» за 9 месяцев 2016, 2018 и 2021 годов с официального сайта Петербургского Метрополитена [4,5,6]. Каждый документ содержит данные также о двух предыдущих годах перед отчетным. Таким образом, была охвачена статистика в период с 2014 года по 2021 год.

В конечном итоге получилась следующая таблица с данными:

Таблица 1

**Показатели структуры перевозки метрополитена за каждые 9 месяцев 2014-2021 гг.**

Год	Удельный вес тарифов, %							Уровень покрытия расходов доходами, %
	Единый электронный билет	Месячный ПБ для студентов	ПБ длительного пользования	Многоразовые ПБ метрополитена	Оплата банковской картой	Жетоны	Право бесплатного проезда	
2014	16,43	0,00	33,46	9,45	0,00	38,63	2,03	71,42
2015	24,00	0,00	33,03	7,85	0,18	26,69	2,05	71,76
2016	26,94	0,00	32,73	5,90	0,65	31,74	2,05	70,38
2017	35,18	1,47	32,17	5,37	0,85	21,97	2,27	69,01
2018	41,10	2,64	30,08	3,82	1,59	17,01	2,29	67,08
2019	43,60	3,10	28,75	3,15	3,28	14,05	2,09	61,75
2020	47,79	2,63	25,27	2,74	6,96	9,53	2,66	42,00
2021	47,95	3,25	26,57	0,48	10,45	7,14	2,89	55,15

Приведенные данные также показывают, что среди жителей и гостей города видна тенденция на переход к более выгодным для них тарифам по оплате проезда. Так, доля единых электронных билетов от всех перевозок выросла на 31,5% за восемь лет, а оплата бесконтактной картой возросла до 10% за аналогичный период. Значительно снизилось использование жетонов как средство оплаты проезда — с 38,63% до 7,14%.

Такие изменения в структуре перевозок находят свое отражение в падении уровня покрытия расходов доходами метрополитена: с 2014 по 2021 годы он уменьшился примерно на 15%, так как за этот временной промежуток появились новые льготные тарифы, которые постепенно начали популяризоваться наравне с другими, уже существующими.

*Регрессионный анализ связи показателей структуры перевозок ГУП «Петербургский метрополитен» и уровня покрытия расходов собственными доходами метрополитена*

Данные для регрессионного анализа были взяты из Таблицы 1. Исходя из вышеупомянутых тенденций структуры перевозки метрополитена, в качестве результативного признака был взят уровень покрытия расходов собственными доходами в процентном выражении, так как значение этого параметра зависит от множества других факторов, например таких, как структура перевозки, количество перевозок, динамика роста цен на проезд и др.

Удельные веса тарифов, входящих в структуру перевозки, были выбраны как независимые переменные вследствие того, что они имеют наибольшее влияние на собственные доходы метрополитена. Данный выбор переменных и отсутствие в них факторов внешней среды обусловлены большим количеством признак-факторов, вовлеченных в анализ, и ограниченностью числа наблюдений.

Результатом множественного регрессионного анализа, в данном случае, линейное уравнение регрессии вида

$$y = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + a + \varepsilon,$$

где  $y$  — признак-результат,  $x_i$  —  $i$ -ый признак-фактор,  $\beta_i$  — коэффициенты регрессии  $i$ -ых признак-факторов,  $a$  — свободный член,  $\varepsilon$  — ненаблюдаемые случайные величины.

Основными характеристиками построенной множественной регрессионной модели являются коэффициент детерминации ( $R^2$ ), коэффициент множественной корреляции (Multiple R), показывающие влияние каждого из признак-факторов на результативный признак. К ним также относятся критерий Фишера и критерий Дарбина-Уотсона, по которым будет делаться вывод о достоверности и значимости полученной регрессионной модели «Уровень покрытия расходов доходами — структура перевозки метрополитена».

С помощью программного пакета для обработки статистических данных «STATISTICA» были посчитаны все необходимые значение параметров для более глубокого анализа взаимосвязи факторов. Полученные значения для удобства их представления сведены в табл. 2:

Таблица 2

**Характеристики регрессионной модели**

Тариф	Параметр	Коэф. детерминации	Beta	Критерий Фишера $F(1,6) = 5,99$	Критерий Дарбина-Уотсона
Единый электронный билет		0,60	-0,78	9,33	1,78
Месячный именной билет метро для студентов		0,47	-0,68	5,28	2,01
ПБ длительного пользования (единые)		0,90	0,95	53,55	2,43
Многоразовые ПБ метрополитена		0,52	0,72	6,51	2,10

Оплата платежной картой в УТ	0,68	-0,83	13,00	2,42
Жетоны	0,61	0,78	9,46	2,21
Перевозка пассажиров, имеющих право бесплатного проезда	0,62	-0,79	9,85	1,83

Уравнение регрессии:

$$Y = -0,78X_1 - 0,68X_2 + 0,95X_3 + 0,72X_4 - 0,83X_5 + 0,78X_6 - 0,79X_7 + 419,5 + \varepsilon$$

Самым значимым признак-фактором является «ПБ длительного пользования (единые)», так как он объясняет разброс значений результативного признака на 90%. Достаточно большое значение коэффициента регрессии говорит о том, что при увеличении этого фактора на одну единицу значение уровня покрытия расходов также увеличится на 0,95.

По результатам множественного регрессионного анализа «Месячный именной билет метро для студентов» оказывает наименьшее влияние на признак-результат, о чем свидетельствует значение критерия Фишера: в данном случае оно ниже табличного, равного 5,99, то есть этот признак-фактор не является значимым.

Остальные признак-факторы оказывают достаточное влияние на уровень покрытия расходов собственными доходами, вследствие того, что соответствующие значения коэффициентов детерминации находятся в пределах от 0,6 до 0,7. Также стоит отметить, что значения критерия Дарбина — Уотсона — меньше 2,5 — позволяют сделать вывод о том, что у данных существует автокорреляция, иными словами, корреляция сохраняется даже с течением времени.

### Заключение

В статье были рассмотрены перспективы развития Санкт-Петербургского метрополитена. Проведя анализ статистики пассажиропотока по станциям и комитета по транспорту и СПб ГКУ «Организатор перевозок» о самых популярных маршрутах наземного транспорта становится ясно, что в Санкт-Петербурге расширять метрополитен — это поспособствует разгрузке наземного транспорта. Особенно нуждаются в новых станциях метро следующие районы города: Красносельский, Красногвардейский, Калининский и юг Кировского.

На основе финансовых отчетов ГУП «Петербургский метрополитен» была построена регрессионная модель «Уровень покрытия расходов доходами — структура перевозки метрополитена», по результатам которой выявили значимость тарифов перевозки пассажиров.

Также не стоит забывать о влиянии пандемии на доходы и расходы метрополитена. За последние два года, в особенности в 2020, сильно упал пассажиропоток, из-за чего метрополитен недополучал прибыль от произведенных возможных перевозок обычных горожан или туристов. В том числе, противодействие коронавирусной инфекции привело к росту расходов вследствие закупки дезинфицирующих средств и средств индивидуальной защиты для сотрудников метрополитена.

Тем не менее, возникшие события не отменяют общую тенденцию роста потребительской привлекательности льготных и выгодных тарифов по оплате проезда. Несмотря на то, что нет роста финансовых показателей, которые важны для метрополитена как для коммерческой организации, предоставление людям возможности пользоваться доступным

общественным транспортом является первостепенной задачей, ведь главная цель общественного транспорта — служение общественным интересам.

Единственный негативный аспект, который может следовать из этого — недостаток инвестиций в развитие метрополитена за счёт собственных средств и увеличение финансирования со стороны государства для необходимого и достаточного роста.

### Список литературы

1. Вукан Р. Вучик; пер. с англ. А. Калинина под научн. ред. М. Блинкина. Транспорт в городах, удобных для жизни // Москва. Территория будущего. 2011.- С. 28.
2. URL: <http://prospectgroup.ru/analytics/passazhiropotok-po-stancyam/> (Дата обращения: 19.03.2022)
3. URL: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c\\_transport/news/201663/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/news/201663/) (Дата обращения: 19.03.2022)
4. URL: [http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs\\_otch\\_9m2016.pdf](http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs_otch_9m2016.pdf) (Дата обращения: 19.03.2022)
5. URL: [http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs\\_otch\\_9m2018.pdf](http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs_otch_9m2018.pdf) (Дата обращения: 19.03.2022)
6. URL: [http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs\\_otch\\_9m2021.pdf](http://www.metro.spb.ru/uploads/document/prs_otch_9m2021.pdf) (Дата обращения: 19.03.2022)

## ПРОБЛЕМЫ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА В СФЕРЕ ФИНАНСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

К.В. ЮМАТОВА, М.А. КОСУХИНА

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

**Аннотация.** В настоящее время мало кто может представить свою жизнь без финансовых технологий. Данный рынок активно развивается и улучшается, и до сих пор он имеет широкие возможности для генерации идей и развития клиентского сервиса. В то время как крупные банки тратят миллиарды рублей на реструктуризацию своих неповоротливых бизнес-моделей, существуют широкие возможности для построения такой компании с нуля уже по новым принципам деятельности. Однако стартапы финансовых технологий сталкиваются с широким рядом проблем и барьеров данной отрасли, которые и приводят к краху большинства новых идей и компаний в сфере финансовых технологий.

**Ключевые слова:** *финансовые технологии, проблемы, барьеры, предпринимательство.*

Сегодня новые технологии перестраивают индустрию финансовых услуг, активно вытесняя традиционных игроков и традиционные бизнес-модели. Интеграция новых финансовых решений позволяет изменять структуру потребления, сокращать затраты на определенный функционал, повышать эффективность и качество бизнеса, а также существенно влиять на устойчивость развития профильного бизнеса и т. д. В результате индустрия финансовых технологий (или FinTech) постепенно превращается в самостоятельный интенсивно развивающийся сектор современной экономики.

Финансовые технологии — это явление достаточно новое, еще мало изученное. Цифровизация внесла в современные реалии революционные изменения, которые преобразовали инфраструктуру и экосистему финансового сектора в новый вид.

Процесс оцифровки характеризуется следующими ключевыми особенностями:

- изменения в бизнес-процессах, а не в способах передачи данных;
- повышение гибкости бизнес-процессов в результате успешного внедрения цифровых технологий;
- интеграция информации с разных стадий жизненного цикла компании и ее продукции;

—рост уровня зависимости традиционных процессов (например, производства) от цифровых технологий;

—децентрализация процессов управления.

Согласно определению Банка России FinTech (финансовые технологии) — это предоставление финансовых услуг и сервисов с использованием инновационных технологий, таких как «большие данные» (Big Data), искусственный интеллект и машинное обучение, роботизация, блокчейн, облачные технологии, биометрия и другие.

Современный процесс модификации финансового сектора определяет новые направления для реализации организациями решений в области построения своей деятельности на основе цифровых механизмов. Актуальным среди финансовых организаций становится переход на новую концепцию ведения своей деятельности, происходит интеграция в финансовых технологиях компании. Финансовые технологии являются клиентоориентированными, преодолевая разрыв между предложениями финансовых компаний и желаниями клиентов. Они нацелены на отраслевые ниши с лучшими продуктами и услугами, чтобы заполнить пробелы, оставленные сотрудниками на протяжении всего пути клиента. В настоящее время FinTech-фирмы проникают почти во все сегменты финансовых услуг, стимулируя как инновации, так и разрушение. Основные направления деятельности FinTech включают в себя цифровые платежи (PayTech), цифровое страхование (InsurTech), банковское дело (BankTech), услуги по управлению активами (WealthTech) и создание рынков для продажи финансовых продуктов.

На современные запросы клиентского сектора, рынок FinTech отозвался появлением новых стартап-компаний из других технологичных отраслей, с уже готовыми IT-технологиями, адаптированными под потребности клиента, успешная реализация которых позволила оторвать финансовую услугу от финансового института, меняя традиционные бизнес-модели. Видимой трансформации подверглись следующие бизнес-процессы:

- платежи и переводы: сервисы онлайн-платежей, сервисы онлайн-переводов, сервисы обмена валют, облачные кассы и смарт-терминалы, сервисы массовых выплат;
- финансирование: онлайн кредитование, бизнес-кредитование, инвестиционные платформы;
- управление капиталом: робо-эдвайзинг, программы и приложения по финансовому планированию, трейдинг, алгоритмическая биржевая торговля, сервисы целевых накоплений и прочие.

Сейчас глобальная FinTech-индустрия развивается как никогда быстро, что приводит к перестраиванию мировой финансовой системы. Ведь то, о чем раньше подумать не могли, в настоящее время уже является обыденной вещью, без которой люди не представляют свою жизнь. Кроме того, большая часть населения становится более избирательной, привыкшей к комфортным условиям.

Однако помимо стимулирующих рост драйверов есть также и ограничители. Компании отрасли финансовых технологий сталкиваются с:

- недостатком квалифицированного персонала;
- недостаточной развитостью финансовой и цифровой инфраструктуры;
- низким уровнем доверия населения;
- увеличением требований клиента к кибербезопасности;

- недоверием потенциальных инвесторов;
- низким уровнем финансовой грамотности и недостаточной технологической осведомленностью населения [1].

Существуют несколько основных причин того, что многие инвесторы с подозрением относятся к проектам финансовых технологий: нежизнеспособные бизнес-модели, высокие затраты на запуск и вывод продукта на рынок, высокая конкуренция по стоимости, высокая стоимость привлечения пользователей онлайн-платформ, отсутствие адекватных методов оценки инвестиционных проектов в данной сфере.

На первый взгляд создать fintech-компанию не так сложно: достаточно решить определенную финансовую проблему, с которой сталкиваются потенциальные клиенты, лучше, чем ваши конкуренты. Однако предпринимателям трудно найти и реализовать жизнеспособную бизнес-модель, которая сможет конкурировать с действующим лидером рынка с огромными финансовыми резервами. На техническом уровне невозможно относительно легко и дешево начать данный бизнес — разработка такого приложения требует капитальных затрат, которые могут достигать до миллионов долларов.

В данной отрасли новички обычно пытаются выйти на рынок, предлагая цифровые решения, противоположные опыту, предлагаемому традиционными банками. Большинство из них, чтобы успешно конкурировать на рынке, пытаются усовершенствовать процесс предоставления кредита и сделать свой продукт доступным для потребителей, которые по тем или иным причинам не пользуются традиционными банковскими услугами. Поэтому альтернативные кредиторы внедряют инновации в сфере предоставления кредитов, страхования, документирования, управления данными, профилями и обслуживанием кредитов, а также систем безопасности.

Помимо крупных инвестиций предпринимателю потребуются опытные программисты и юристы, которые помогут разобраться в нормах права. Накладные расходы на консалтинг в этой сфере очень высоки, но без него бизнес потеряет гораздо больше, чем сэкономит. Наибольшими проблемами могут стать получение лицензии или нарушение законодательства, т.к. из-за своей новизны данная отрасль деятельности недостаточно урегулирована с правовой точки зрения.

Но соблюдение законности, как бы ни было это сложно, — лишь одна из статей расходов при организации FinTech-компаний. Безопасность и необходимость сбора подробной информации о клиенте, его финансовом положении становятся основной проблемой разработчиков. У предпринимателя может быть совершенно удивительная идея, но, если компания и продукт не внушают доверия с точки зрения безопасности, привлечение новых клиентов станет затруднительным.

Основными статьями затрат в данной категории станут: проверки личности клиента и контрольные проверки, проверки в бюро кредитных историй, агрегирование банковских данных и денежных переводов. Кроме того, необходимо заплатить за разработку приложения, связывающего такие функции, как ведение бухгалтерского учета субсчетов, управление транзакциями и бизнес-процессы.

В своих усилиях по привлечению инвестиций FinTech-стартапы неоднократно оценивались по объемным показателям, типичным для потребительских интернет-компаний. Это обусловлено тем, что FinTech применяет бизнес-модели, которые используют возможности большого количества клиентов и транзакций, обеспечивающие сетевые эффекты. Поэтому кроме проблем, указанных выше, предпринимателям

при запуске предстоит разрешить ряд проблем для всех платформ онлайн-кредитования, в том числе такие:

- без начального контента пользователи не хотят присоединяться и генерировать контент дальше;
- если доступ и использование платформы предоставляются за плату, пользователи не желают вступать; если доступ и использование бесплатны, платформа экономически нежизнеспособна.

Fintech-порталы становятся успешными, достигая критической массы пользователей за счет приобретения все более дорогостоящего трафика. При этом то, что стоимость привлечения клиента должна быть меньше, чем генерируемая этим клиентом прибыль, кажется очевидным, но многие предприниматели не уделяют должного внимания выяснению реальной стоимости приобретения клиента. Кроме этого, не нужно забывать про эффективность капитала – нужно понимать, сколько времени займет покрытие затрат на привлечение клиента.

Чтобы привлечь одного пользователя сервис вынужден в среднем потратить \$3,38 — на установку, \$4,69 — на регистрацию и \$304 — на подписку. Удержание лояльного пользователя обходится сервису в \$4 [2].

Согласно Statista, самое дорогое пользовательское действие как на Android, так и на iOS, — подписка (для Android эта стоимость составляет \$187,27, а для iOS — \$159,20). Для сравнения, средняя стоимость приобретения пользователя мобильного приложения, зарегистрированного в приложении или создавшего учетную запись, составляет, по данным Statista, \$8,21 [3].

В последнее время инновации в области финансовых технологий произвели революцию, связанную с финансами, и изменили способы управления ими. FinTech-компании находятся на передовой этих изменений, но добиться успеха на этом рынке далеко не так просто, как кажется.

Цель каждого стартапа — это обеспечение финансирования для роста. Тем не менее, большинство FinTech-стартапов запускаются с избытком идей и оптимизма, но без капитала для тестирования и масштабирования своих продуктов. Таким образом, их путешествие заканчивается прежде, чем они смогут заработать денег, и прежде, чем более широкая финансовая экосистема сможет извлечь выгоду из этих инноваций. Для выживания на рынке предпринимателю прежде всего необходимо четко понимать свою бизнес-модель доходов, и то, как он собирается в конечном итоге зарабатывать деньги: непосредственно на выдаче займов потребителям, инвестициях, или косвенно, а именно на оказании посреднических услуг (страхование и транзакции). Последняя модель, основанная исключительно на генерации пользователей и без четкого понимания того, как она будет монетизироваться, обречена на неудачу в долгосрочной перспективе.

### Список литературы

1. Таланова М.И. Финансовые технологии (FINTECH): проблемы и перспективы развития. Журнал E-SCIO, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. Москва, 2021. № 6. Стр. 323-333.
2. Платформа оптимизации таргетирования для мобильных приложений LiftOff. [электронный ресурс]. URL: <https://liftoff.io/>.
3. Статистическое агентство Statista [электронный ресурс]. URL: <https://www.statista.com/>.

## СЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОД, АВТОМАТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

### СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ

А.А. БОГАТОВ

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

**Аннотация.** Практически все электроэнергия вырабатывается электрогенераторами. Но для генерации больших мощностей необходимо осуществить параллельную работу генераторов. Для этого есть блоки распределения нагрузки, которые позволяют подключать несколько генераторов к одной шине. В основном, оборудование представлено фирмой Deif. В данной статье описан пример подобного устройства, но реализованного на плате с микроконтроллером STM32. Также, на плате реализован интерфейс modbus RTU для взаимодействия платы с компьютером.

*Ключевые слова:* микроконтроллер, блок распределения нагрузки, генератор, модбас

#### Электрогенераторы

Существует много источников электроэнергии, например, солнечные панели, ветрогенераторы, топливные ячейки, химические элементы (батарейки). Но подавляющим большинством источников электроэнергии являются электрогенераторы. Электрогенераторы — это такие электрические машины, которые преобразуют механическое вращательное движение в электрическую энергию. По типу приводных двигателей генераторы можно разделить на дизель-генераторы, турбогенераторы и валогенераторы. Первые в качестве приводного двигателя используют дизель. Вторые — паровую или газовую турбину. Третьи приводятся во вращения от вала главного двигателя.

#### Распределение электроэнергии

Для обеспечения всех потребителей электроэнергией, её необходимо передать от судовой электростанции в другие помещения. На судне масса играет важное значение, поэтому для экономии кабеля и упрощения схемы используют вторичные распределительные щиты. Например, в некотором помещении стоит вторичный щит, и к нему от главного щита идет несколько кабелей. Далее, от этого щита расходятся кабели по своим потребителям. Это освобождает от необходимости тянуть от главного распределительного щита множество кабелей разного сечения, а так же повышает надежность и удобство в эксплуатации и обслуживании. На рис. 1 представлена такая схема, где ГРЩ- главный распределительный щит, ВРЩ- вторичный распределительный щит, СГ- синхронный генератор.

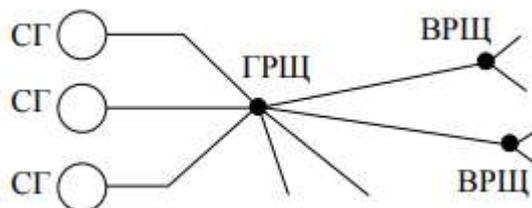


Рис. 1. Принципиальная схема электроэнергетической системы.

Как видно, большая часть потребителей питается именно от ВРЩ, однако особо мощные потребители питаются именно от ГРЩ. К таким относятся рулевое устройство или подруливающее устройство.

### Блок распределения нагрузки LSU-113DG

За образец был взят блок распределения нагрузки фирмы Deif — LSU-113DG.



Рис. 2. LSU-113DG.

Все блоки распределения нагрузки Deif предлагают различные способы распределения нагрузки между генераторами и интерфейсами с регулятором через электронный потенциометр.

Подходят для управления дизельными и газовыми генераторами, например, могут управлять силовой установкой в автономном режиме (осуществляя регулирование частоты) или параллельно с другими энергоустановками (осуществляя регулирование частоты и мощности).

Блоки имеют встроенные преобразователи мощности и частоты, которые позволяют подключать внешнее оборудование. Также возможен режим постоянной мощности или изохронный режим. Регулирование скорости осуществляется двумя реле.

LSU-113DG воздействует на регулятор частоты приводного двигателя генераторного агрегата. LSU-113DG обеспечивает режимы работы агрегата:

- одиночная работа с поддержанием частоты
- параллельная работа с сетью с поддержанием заданной мощности
- параллельная работа с другими генераторами с поддержанием частоты и распределением мощности.

### Протокол modbus RTU

Для взаимодействия между собой, промышленные устройства используют различные протоколы связи. Наиболее распространенным является протокол для M2M (machine to machine) взаимодействия — modbus. Он был разработан компанией Modicon для их собственных контроллеров с программируемой логикой. Спецификация на протокол была опубликована в 1979 году. Modbus основан на архитектуре ведущий — ведомый и используется через последовательные линии связи RS-485, RS-422, RS-232 и сети TCP/IP. Существует несколько вариантов протокола

Modbus ASCII — для обмена используются ASCII символы. Для проверки целостности используется однобайтовая контрольная сумма. Начало и конец сообщения помечаются специальными символами.

Modbus RTU — компактный двоичный вариант. Сообщения разделяются по паузе в линии. Сообщение должно начинаться и заканчиваться интервалом тишины, длительно-

стью не менее 3,5 символов при данной скорости передачи. Во время передачи сообщения не должно быть пауз длительностью более 1,5 символов. Для скоростей более 19200 бод допускается использовать интервалы 1,75 и 0,75 мс, соответственно.

Modbus TCP — для передачи данных через TCP/IP-соединение.

Сообщение в протоколе modbus rtu начинается с адреса ведомого устройства, которое может принимать значения от 0 до 247, т.к. адреса 248-255 зарезервированы. Далее идет код функции, т.е. код определенной команды, которую должно выполнить устройство.

Таблица 1

### Коды функций для протокола modbus rtu

Код функции	Что нужно сделать		Тип значения	Тип доступа
01 (0x01)	Чтение DO	Read Coil Status	Дискретное	Чтение
02 (0x02)	Чтение DI	Read Input Status	Дискретное	Чтение
03 (0x03)	Чтение АО	Read Holding Registers	16 битное	Чтение
04 (0x04)	Чтение AI	Read Input Registers	16 битное	Чтение
05 (0x05)	Запись одного DO	Force Single Coil	Дискретное	Запись
06 (0x06)	Запись одного АО	Preset Single Register	16 битное	Запись
15 (0x0F)	Запись нескольких DO	Force Multiple Coils	Дискретное	Запись
16 (0x10)	Запись нескольких АО	Preset Multiple Registers	16 битное	Запись

Далее идут данные, структура которых меняется в зависимости от команды. В табл. 2 представлены адреса и номера регистров.

Таблица 2

### Адреса и номера регистров

Номер регистра	Адрес регистра	Тип	Название	Тип
1-9999	0000 до 270E	Чтение-запись	Discrete Output Coils	DO
10001-19999	0000 до 270E	Чтение	Discrete Input Contacts	DI
30001-39999	0000 до 270E	Чтение	Analog Input Registers	AI
40001-49999	0000 до 270E	Чтение-запись	Analog Output Holding Registers	АО

Общий вид сообщения выглядит так: адрес, код функции, данные, crc. Такой протокол был полностью реализован на плате STM32 с микроконтроллером F446RE.

### Блок распределения нагрузки на STM32

Программа для устройства была написана на языке C в среде разработки CubeIDE и Keil. Принцип действия основан на измерении напряжения и тока. Далее, происходит вычисление частоты и мощности генератора. Вычисление активной мощности происходит исходя из заранее заданного  $\cos(\varphi)$ . Для измерения напряжения предлагается использовать понижающие трансформаторы в сочетании с делителем напряжения, например ТП132-1, а также выпрямитель без фильтра. Микроконтроллер обладает частотой в 72МГц, что позволяет измерять напряжение и пульсации прямо на его пинах.

Таким образом, можно измерить напряжение посредством встроенного АЦП, а также частоту тока. Силу тока предлагается измерять с помощью трансформатором тока или датчиков тока на эффекте Холла.

Для распределения нагрузки по генераторам, необходимо регулировать подачу топлива, а следовательно, и частоту вращения вала. Исходя из полученных данных, микроконтроллер выдает сигнал на уменьшение или увеличение подачи топлива. В таком случае, меняется частота вращения вала генератора и происходит перераспределение нагрузки. Управление происходит через компьютер, к которому подключена плата посредством кабеля usb.

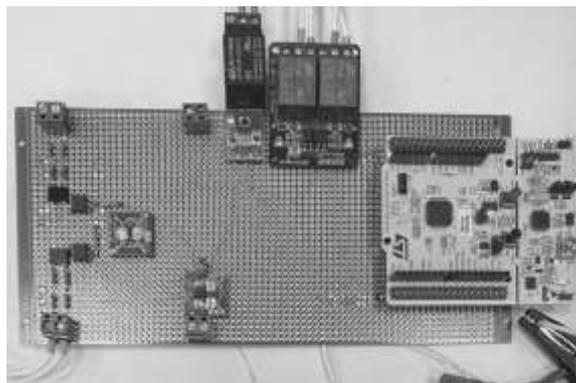


Рис. 3. Макет устройства.

#### **Актуальность**

STM32 была выбрана из-за дешевизны и доступности, однако проект возможно портировать на отечественный процессор МИЛАНДР. Таким образом, устройство будет являться полностью отечественной разработкой и сможет составить конкуренцию зарубежному оборудованию в этой категории.

#### **Список литературы**

1. Воскобович В.Ю., Королева Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств: Учебное издание / Под ред. Ю.А. Лукомского. СПб.: «Элмор», 2001. 384с.
2. Б.В. Бруслиновский, Л.Н. Токарев, В.Н. Шелудько. Электроэнергетические системы судов с электродвижением. / Под ред. Проф. Л.Н. Токарева. СПб Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 343с
3. Data sheet on DEIF LSU-113DG 4921240120 / <https://deif-cdn-umbraco.azureedge.net/media/ho1bylhj/lsu-113dg-data-sheet-4921240120-ru.pdf?rnd=132790511105670000&v=5> (дата обращения 17.05.22)
4. Interfacing DEIF equipment to governors and AVRs / <https://deif-cdn-umbraco.azureedge.net/media/wtgp3f3o/application-notes-interfacing-deif-equipment-4189340670-uk.pdf?rnd=132742686549130000&v=5> (дата обращения 17.05.22)
5. Modbus RTU / <https://ipc2u.ru/articles/prostye-resheniya/modbus-rtu/> (дата обращения 17.05.22)

## **СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА**

Э.Р. ГЕЙМОНЕН, И.В. ГЕНСЕР

**Аннотация.** Задача создания системы определения мгновенного расхода топлива. В первую очередь была определено устройство работы дизель-генератора. Так как существует возможность подключить нагрузку на дизель-генератор, была установлена розетка, через которую подключалась нагрузка на дизель.

Для реализации нагрузки, были выбраны стенды с высоким сопротивлением, для создания 5 кВт нагрузки на установку. На резисторную установку подключили последовательно платы сопротивления для получения 52 Ом для того чтобы отследить правильность подсчитанных значений. Так как шаг измерения происходит в 20% соотношении. От 1 кВт до 5 кВт, что является максимальной нагрузкой на агрегат. В последствии произвели коммутацию и встроили в нее счетчик, для точного определения токов, напряжений и нагрузки.

После того как все было установлено, произвели замеры расхода топлива в зависимости от определенной нагрузки на дизель. По итогу получилась возможность определить систему замеров расхода топлива.

Для чего необходима система измерения мгновенного расхода топлива дизельгенератора? Основная задача заключается в том, что любая компания или организация стремится свести свои расходы к минимуму, а данная система позволит определить средний расход топлива на определенных значениях нагрузки и оборотах, что позволит в дальнейшем подстраивать установки под необходимые условия работы.

Перед тем, как придумать систему, было решено определить расход топлива для дизель-генератора, который присутствует на базе университета, посмотреть, каким образом в реальных условиях можно измерить расход топлива и каким образом влияет нагрузка на всю систему. Для этого были установлены нагрузочные резисторы и счетчик для замеров мощности на дизеле. Также понадобились приборы для замера расхода топлива, скорости вращения и тока и напряжения на возбуждении.

Подключив всю установку, можно приступить к замерам. Для начала необходимо измерить расход топлива на холостом ходу и посмотреть с какой скоростью тратится топливо. Далее переходим к подключению нагрузки. Используя счетчик, можно будет точно узнать нагрузки на ДГУ. Так как установка старая и сопротивление на каждом резисторе может быть разным, аналитические расчёты могут привести к большим погрешностям, поэтому какова нагрузка во всей системе проверяем опытным путём.

Записав протокол и составив табл. 1 полученных результатов, можно увидеть нагрузку на каждом шаге измерений. На основе этих данных был составлен график зависимости расхода топлива от уровня активного сопротивления. Все измерения занесены в протокол (табл. 1).

Таблица 1

### Протокол измерений

<b>Теоретическая нагрузка (Вт)</b>	холостой ход	974,24	1948,47	2922,71	4046,82	4676,33
<b>Время работы (секунды)</b>	132	135	125	128	124	120
<b>Кол. потраченного топлива (мл)</b>	30	40	43	54	64	76
<b>Реальная нагрузка (Вт)</b>	0	1164,22	2264,69	3395,35	4429,59	5473,89
<b>Расход топлива в секунду (мл/с)</b>	0,227	0,296	0,344	0,422	0,516	0,633

Из получившихся данных можно составить график расхода топлива от нагрузки на ДГУ (рис.1). В нем можно заметить, что при увеличении нагрузки растёт и расход топлива. К тому же нужно брать в учет, что многие факторы могут влиять на расход,

такие как температура среды, температура дизеля, время работы, насколько разогрелся сам СДГ и тому подобное. [1]

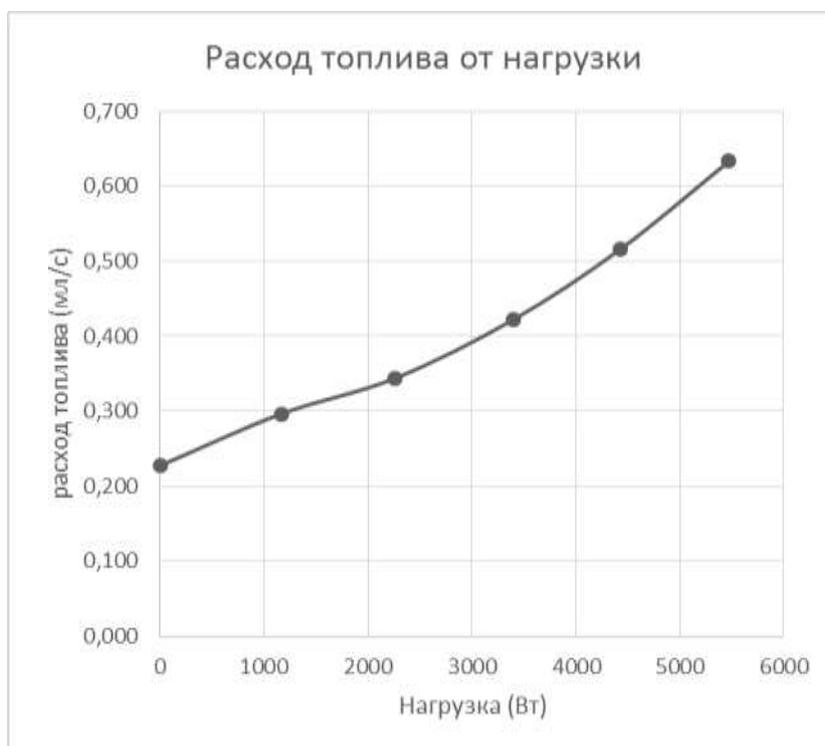


Рис. 1. График расхода топлива в первом эксперименте

После проведения измерений, был проведен еще один эксперимент, где мы измеряли ток и напряжение на возбуждении при различных нагрузках, протокол измерений приведен в табл. 2.

Таблица 2

**Второй протокол измерений**

Обороты	3150	3115	3090	3050	3025	2990
Время работы (секунды)	132	90	88	92	60	60
Кол. потраченного топлива (мл)	30	38	34	42	32	38
Реальная нагрузка (Вт)	0	1164,22	2264,69	3395,35	4429,59	5473,89
Расход топлива в секунду (мл/с)	0,227	0,422	0,386	0,457	0,533	0,633
Ток (А)	0,525	0,725	1,07	1,45	1,795	2,16
Напряжение (В)	65	80	94	112	128	142,5

По результатам второго эксперимента можно построить график расхода топлива (рис. 2).



Рис. 2. Расход топлива во втором эксперименте.

Чтобы получить средний расход топлива для дизель-генератора, необходимо построить пошаговую нагрузку или определить пределы работы агрегата, чтобы понимать, на какой мощности он будет работать, из этого уже получать средний расход топлива. Для получения данных по расходу топлива можно использовать различные системы по измерению уровня топлива в баке, что позволит получить точную картину происходящего. Если представлять это как структурную схему, то должна быть расходомерная ёмкость, в неё помещен определитель уровня топлива. Все данные, поступающие на датчик, отправляются на микроконтроллер. С него все данные передаются человеку и записываются в определенный файл, в котором будет информация от главного агрегата (нагрузка, мощность и обороты). [2]

Тривиальная схема исследовательского стенда представлена на рис. 3.[4]

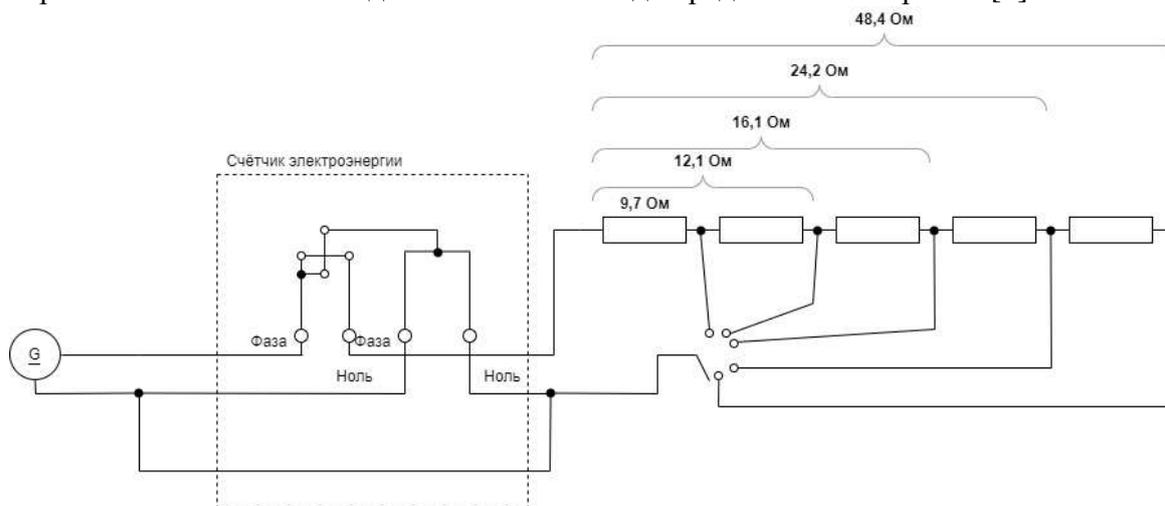


Рис. 3. Тривиальная схема исследовательского стенда.

Физическая модель стенда, с которого были сняты все показания, представлена на рис. 4.



*Рис.4. Исследовательский стенд.*

Теперь необходимо поразмышлять над созданием тривиальной системы автоматического возбуждения синхронного дизель-генератора. Для задачи подобного рода достаточно простейшего микроконтроллера типа Arduino UNO.

Нам необходимо сделать так, чтобы напряжение на клеммах генератора поступало на микроконтроллер, после чего обработанный сигнал поступал на обмотку возбуждения. Для этого нужно сделать так, чтобы поступающее на контроллер напряжение укладывалось в диапазон 0-5В. Для достижения этой цели можно поставить на выход трансформатор, например, 220/6 В, после чего последовательно поставить датчик напряжения, который изменит среднюю точку выходного сигнала и оставит только положительную его часть, так как микроконтроллер не в состоянии принимать отрицательное напряжение. Наконец, так как нам необходимо напряжение до 5В, понадобится делитель напряжения со значениями, к примеру, 5кОм и 1кОм.

На выходе микроконтроллера мы получаем напряжение того же диапазона. Тут нам может пригодиться выпрямитель со входом 0-5В, который регулирует выходное значение в диапазоне 0-320В. На основе этой элементной базы возможно создание системы, которая способна регулировать возбуждение на генераторе в зависимости от его нагрузки, учитывая оптимальные параметры расхода топлива. [3]

Примерная блок-схема полученной системы представлена на рисунке 5.[4]

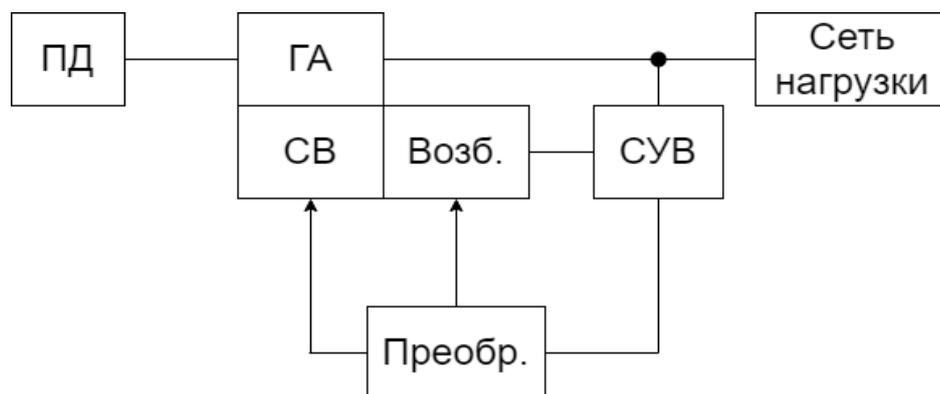


Рис. 5. Блок-схема системы возбуждения.

ПД — Первичный двигатель, ГА — Генераторный агрегат, СВ — Система возбуждения, Возб. — Возбудитель, Преобр. — Преобразователь, СУВ — Система управления возбуждением.

Результаты проделанной работы позволяют говорить о возможности реализации на базе имеющейся лабораторной установки дизель-генераторной станции, работающей в долевых режимах нагрузки на оптимальной, с точки зрения расхода топлива частоте.

Перспективным решением видится создание системы управления возбуждением и частотой вращения генераторного агрегата для оптимизации его работы совместно с преобразователем частоты, формирующим питающую сеть для потребителей.

В долгосрочной перспективе — разработка и отладка схемотехнических решений и алгоритмов для обеспечения параллельной работы таких систем. Последнее обеспечит возможность применения модульного подхода при организации энергоснабжения удаленных объектов и возможность объединения с альтернативными источниками электроэнергии

### Список литературы

1. <https://www.comd.ru/about-company/press-center/articles/raskhod-topliva-dizelnogo-generatora/>
2. <https://jv-technoton.com>
3. Иносов В. Л., Цукерник Л. В., Компаундирование и электромагнитный корректор напряжения синхронных генераторов, М.— Л., 1954
4. Draw.io — инструмент для создания диаграмм, блок-схем, программных блоков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Л.А. ЗИГАНШИНА, К.А. ПОРОХНЕНКО

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

**Аннотация.** Исследуется электромеханическая система с возмущающими воздействиями. Коэффициенты упругой передачи влияют на систему, что приводит к необходимости построения регулятора для стабилизации переходного процесса. В работе представлена модель системы выполненная в MatLab, рассчитанный регулятор позволяет скорректировать переходный процесс.

**Ключевые слова:** упругие связи, сложная электромеханическая система, переходные процессы.

Как правило, при рассмотрении автоматизированных систем управления механические связи между движущимися массами системы принимаются абсолютно жесткими. Подобное представление механической части электропривода не всегда отражает действительный характер движения, так как не учитывает влияние упругости в реальных механических связях.

Строго говоря, реальный механизм почти всегда представляет собой систему с распределёнными параметрами. Однако в большинстве случаев достаточно рассматривать механизм в виде системы с сосредоточенными параметрами. При этом необходимо принять следующие допущения:

1. Силы и моменты, действующие в системе, приложены к сосредоточенным массам;
2. Упругие звенья невесомы и характеризуются постоянной жёсткостью, т.е. постоянным коэффициентом пропорциональности между моментом и деформацией;
3. Волновым характером распространения деформации можно пренебречь.

Наиболее распространенным является случай, когда якорь двигателя и исполнительный орган, связанные упругосвязкой передачей, образуют двухмассовую электромеханическую систему

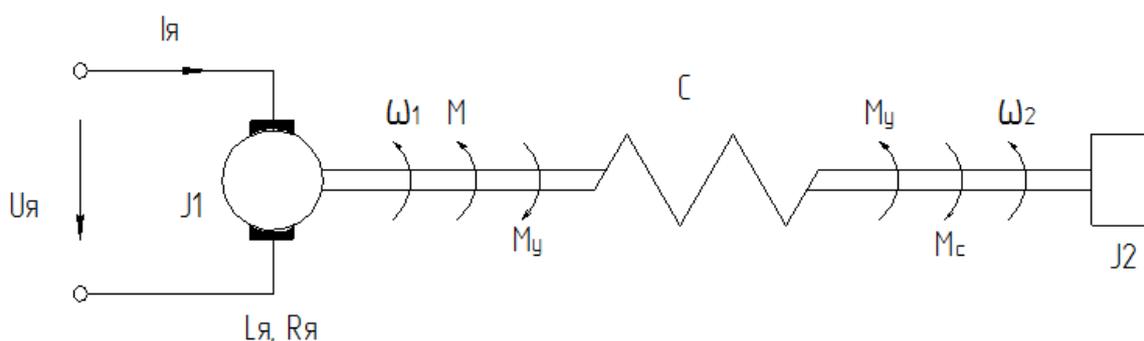


Рис. 1. Функциональная схема двухмассовой электромеханической системы с упругой связью.

Далее необходимо провести моделирование заданной электромеханической системы. Построим обратные связи по контуру тока, скорости и углу поворота.

Настройка контура скорости заключается в использовании П-регулятора, значение коэффициента усиления которого определяется экспериментально. По результатам экспериментального перебора значений коэффициента усиления выбрано значение 50.

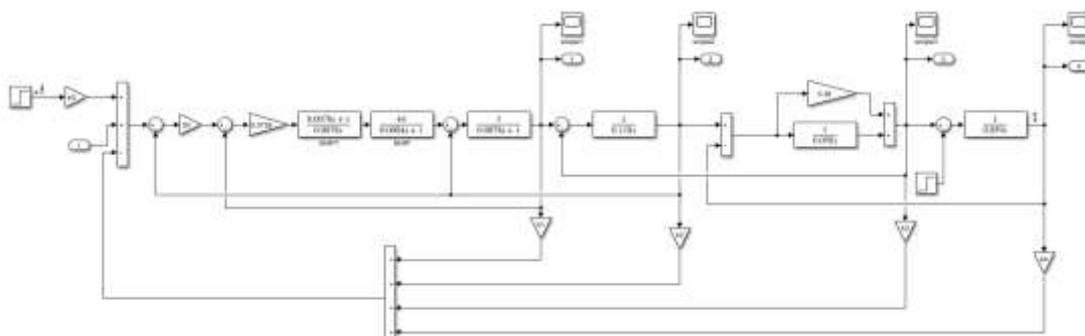


Рис. 2. Общий вид системы с оптимальным регулятором.

Процедуру расчета коэффициентов усиления оптимального регулятора произведём в среде MATLAB. Для этого используем функцию:  $[K,S,E]=lqry(sys,Q,R,N)$ . Так как входы и выходы нашей системы не связаны, то матрицу  $N$  примем нулевой. Матрицу  $R$  примем единичной.

Таким образом, коэффициенты усиления оптимального регулятора зависят от значений элементов матрицы  $Q$ .

В результате синтеза оптимального регулятора был получен переходный процесс без перерегулирования и колебаний со значением времени регулирования 0.18 с.

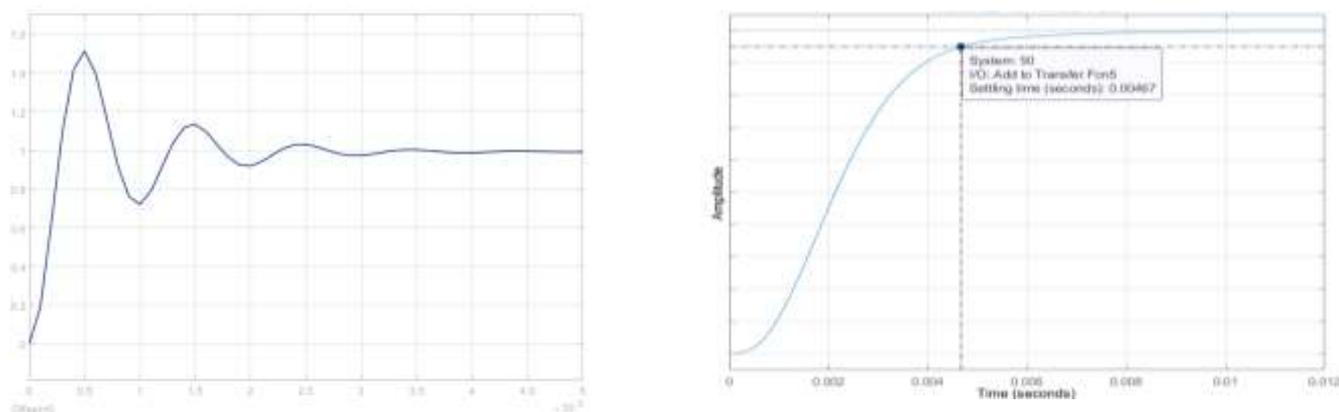


Рис. 3. Переходный процесс до и после настройки регулятора.

Помимо этого, был проведен эксперимент, в котором в систему подавалось возмущающее воздействие  $M_c = 0.1$ . Переходный процесс при этом имел существенную статическую ошибку, и система не обрабатывала возмущение. После была проведена коррекция разделительным звеном. По результатам моделирования статическая ошибка составила 3%, а компенсация возмущающего воздействия происходит приблизительно за 1 секунду.

### Список литературы

1. Александр Осичев, Ольга Королева und Андрей Ткаченко. Моделирование, анализ, синтез электроприводов со сложной кинематикой. Том 2. — М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. — 224 с.
2. Ю.А. Борцов , Г.Г. Соколовский. Автоматизированный электропривод с упругими связями. — М.: Энергоатомиздат, 1992. — 288 с.
3. М.Я. Израилович. Элементы теории оптимального управления периодическими режимами виброударных систем. Системы, линейные в промежутках между соударениями. — М.: Либроком, 2010. — 104 с.
4. Юрий Гольдштейн. Динамика и устойчивость конструкций с односторонними связями. — М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. — 152 с.

## СЕКЦИЯ ЛИНГВИСТИКА

### ЭМОЦИОНАЛЬНО-ОЦЕНОЧНЫЕ ЯЗЫКОВЫЕ СРЕДСТВА В ДИСКУРСЕ АНГЛОЯЗЫЧНЫХ СМИ

Д.А. ЛАВРЕНТЬЕВ

*Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина*

**Аннотация.** В данной статье рассматривается проблема конструирования маскулинности и феминности в дискурсе англоязычных глянцевого журналов посредством эмоционально-оценочных языковых средств. Приведены отличительные особенности использования приёмов экспрессивно-оценочной коннотации в контексте исследуемого дискурса, рассмотрена типология и факторы употребления метафорических моделей, особенности отражения гендерной дихотомии в английском языке.

**Ключевые слова:** *метафора, гендер, дискурс, маскулинность, феминность, языковые средства, конструирование.*

Дискурс глянцевого журналов (ГЖ) носит динамический и коммуникативный характер, что предполагает употребление приёмов разговорной речи и образно-эмоциональных языковых средств. Подобные языковые единицы содержат многочисленные предикаты гендерной оценки разной степени интенсивности, посредством чего осуществляется дискурсивное конструирование маскулинности и феминности.

Следует отметить, что такие образные средства, как эпитеты, семантические гендерные номинации, устойчивые сочетания и фразеологизмы, гиперболы, сравнения, олицетворения, зооморфизмы, метафоры, пословицы и поговорки являются языковым отражением национального образного мышления, которое содержит общенародное понимание основных бытийных, в том числе и гендерных, категорий. Использование образно-оценочных языковых единиц при описании феминности и маскулинности в дискурсе англоязычных ГЖ косвенно отражает особенности национальных языковых и гендерных картин мира [1].

Фразеологизмы и крылатые выражения в высказываниях с гендерной тематикой служат средством когнитивного усвоения информации: *The key for me staying healthy and happy is by being the pilot and not a backseat driver.* (Elle, May 2019).

Для усиления воздействующего эффекта гендерных характеристик используются риторические приемы, например, гипербола: *Even though Michele's only been in his role for four years-decades, basically, in the fashion game — he's managed to incept the creative world with his ideas, and his influence extends across the fashion spectrum* (GQ, January 2019).

В дискурсе модных журнальных изданий мужские и женские характеристики наделяются экспрессивно-оценочной коннотацией при помощи следующих приёмов:

1. Сравнения (нераспространенные, распространенные, осложнённые придаточными предложениями, причастными и деепричастными оборотами): *She stepped into the role as if she'd belonged in that motley monster-fighting crew all along and introduced us to a character who revealed her emotional depth more and more every episode* (Elle, July 2019).

2. Зооморфизмы: It's not just the penis-rubbers they're after either, but the gropers, the flashers, the up-skirters, the masturbators... turns out there's a whole host of sexual *predators* roaming the underground for their kicks (Cosmopolitan, October 2018).

3. Персонификации (наделение неодушевлённых предметов свойствами одушевлённых): She is ringing stardom and is the coolest, most down to earth girl — the *camera loves* her and she has a real personality. (Elle, February 2019).

Употребление метафорического приема при гендерном представлении способствует возникновению языковой полисемии, служит причиной появления новых значений и их особенностей, усиливает эмоционально-экспрессивный характер лексики. При этом, в британских ГЖ метафоры имеют общечеловеческое значение, не придавая оценочной коннотации феминным и маскулинным характеристикам. В соответствии с классификацией А. П. Чудинова, издатели ГЖ используют следующие типы метафорических моделей, описывающих гендерные отношения: антропоморфную метафору, когда объекты реальности рассматриваются по человеческому подобию; метафору природы, в которой явления изображаются терминами живой и неживой природы; социоморфную метафору, отражающую социальные связи, в частности, криминальную, милитарную, спортивную, игровую, а также кулинарную и артефактную метафору дома и механизмов [2].

В дискурсе британских ГЖ встречается большинство представленных метафорических моделей:

1. Антропоморфная метафора: There's a reason why the aloe plant isn't just adored by crunchy types, but the general public: It's almost as if *nature gifted* us this elixir just so our lobster-like skin could find soothing relief (Elle, June 2019).

2. Природная метафора: Get out all the tissues because Trey Moses, a senior at Eastern High in Louisville, Kentucky, and a *shining star* on his school's basketball team, is about to make you cry all the happy tears (Cosmopolitan, April 2015); I know, it's hard to believe it's been 10 years since we saw a bewildered, aspiring journalist Andy Sachs (Anne Hathaway) *storm into* editor-in-chief of fictional Runway fashion magazine (Elle, January 2017).

3. Милитарная метафора: Department stores are closing faster than you can say «Amazon Prime,» and the promise of the internet has devolved into a *bloody battle* in which legacy brands compete with upstart designers for increasingly demanding consumers (GQ, October 2019).

4. Спортивная и игровая метафоры: We've never *hit a buzzer beater* in the tourney or sunk a victory-clinching putt at the Masters, but we'd have to imagine the feeling is similar to the dopamine rush that comes with buying something seriously cool at a preposterously low price (GQ, April 2019); «Women don't deserve to be manipulated into thinking this is something they should *strive for* — this decaying turkey of a man who'd been encouraged to believe, like so many other men, that he was a *great prize* for someone like me.» (Cosmopolitan, August 2016).

5. Кулинарная метафора: You can only see half of their face and you can't touch. It is very surreal and also has a '*forbidden fruit*' element — it's kind of exciting (GQ, July 2020).

В британских ГЖ в качестве иносказания используется прием иронии, противопоставляя контекстуальный смысл значения буквальному значению, или же полностью его отрицая. Иронические комментарии в мужских и женских ГЖ относятся к представителям противоположного пола и комментируют жизненные ситуации: They were set to do it the middle-class way – get the university education, map out the career flight plan, sigh over relationships for 15 years or so and then wheel out the fertility treatment on the cusp of their 40th birthdays, when Mother Nature had come to the conclusion

that their *shagged-out old bodies* were not that interested in the propagation of the human race (GQ, March 2016).

Резюмируя вышесказанное, совокупность эмоционально-оценочных гендерно релевантных языковых средств, используемых при конструировании маскулинности и феминности в дискурсе англоязычных ГЖ, отражает тенденцию западного общества к ослаблению гендерной дихотомии.

#### **Список литературы**

1. Зиновьева Е.С. Языковые механизмы конструирования маскулинности и феминности в дискурсе глянцевого журналов (на материале английского и русского языков). Ярославль, 2018. — 235 с.
2. Чудинов А.П. Россия в метафорическом зеркале: когнитивное исследование политической метафоры. Екатеринбург, 2001. — 238 с.

## СЕКЦИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

### ЦИФРОВОЙ ПИКСЕЛЬ

Д.Е. АЛЬШЕВ

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

**Аннотация.** В данной статье исследуются алгоритмы передискретизации изображений, чтобы определить лучший, для реализации его в системе машинного зрения. Исследования производятся по среднеквадратической ошибке (СКО) и частотно-контрастной характеристике (ЧКХ). В дальнейшем данный алгоритм будет использоваться для биннинга изображения.

**Ключевые слова:** *Биннинг, Частотно-контрастная характеристика, Передискретизация изображения.*

**Цель данной научной работы** — исследовать в алгоритмах дискретизации изображения среднеквадратическую ошибку (СКО) и частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), чтобы использовать данные алгоритмы на FPGA в системе машинного зрения для биннинга изображения в заданных характеристиках.

**Биннинг** — это процесс объединения заряда от соседних пикселей в фотоприемнике (ФП) во время считывания. Этот процесс выполняется до оцифровки в микросхеме ФП с помощью специализированного управления последовательным и параллельным регистрами. Двумя основными преимуществами биннинга являются улучшенное отношение сигнал / шум (ОСШ) и возможность увеличивать частоту кадров, хотя и за счет уменьшения пространственного разрешения. Для биннинга могут быть разные причины: одни пользователи хотят увеличить яркость изображения, другие — сократить объем данных. Кому-то необходимо увеличить частоту кадров, другие ищут простую замену снятому с производства сенсору.

Биннинг может помочь решить эти задачи. С помощью биннинга можно уменьшить разрешение при сохранении поля зрения и улучшить определенные характеристики сенсора, такие как динамический диапазон и ОСШ. В теории при применении биннинга уменьшается объем обрабатываемых данных, нередко возрастает частота кадров, а также сокращается продолжительность экспозиции или увеличивается яркость изображения. На практике, однако, основным недостатком традиционного биннинга является то, что он выполняется на основе исключительно целочисленных множителей. Однако такое резкое уменьшение разрешения не всегда необходимо или даже препятствует решению задачи, стоящей перед системой машинного зрения. Оптимальное разрешение часто находится где-то посередине, однако получить его с помощью целочисленных множителей биннинга невозможно. **Цель данной работы** состоит в том чтобы использовать десятичные множители в дополнение к целочисленным.

При исследовании использовались алгоритмы передискретизации изображения, которые имеются в библиотеках MATLAB.

Анализ проводился на сером изображении размером 512x512 пикселей с некоторым заданным значением шума. Результаты с различными значениями сжатия приведены

в рис. 1. Здесь параметр «Scale» — означает значение масштабирования относительно изначального изображения, где 1 — изображение 512x512 пикселей, а 0.2 — 103x103 пикселя.

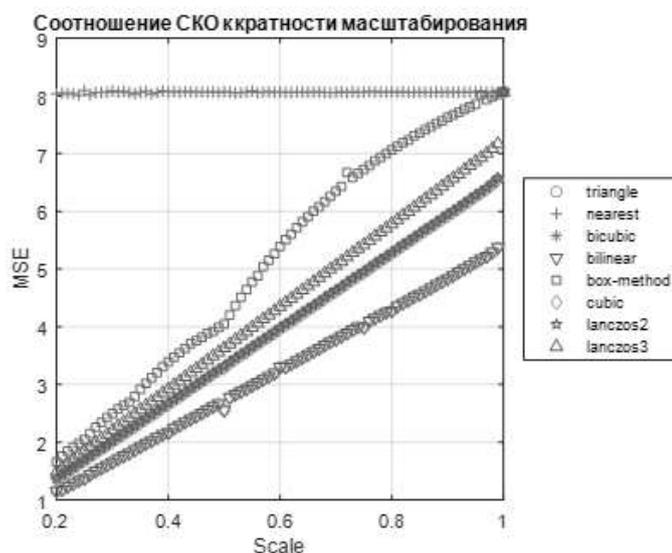


Рис. 1. Соотношение СКО к кратности изображения.

Существует несколько методов измерений ЧКХ. Наибольшее распространение получил метод, который основан на использовании наклонной границы объекта, именно этот метод описан в стандарте ISO 12233 [1-3]. ЧКХ связана с разрешающей способностью, и также характеризует способность передавать мелкие близко расположенные фрагменты изображений. ЧКХ показывает зависимость коэффициента передачи контраста от пространственной частоты. Обычно количественная оценка ЧКХ это значение пространственной частоты на половине максимального значения контраста (ЧКХ50). График ЧКХ описывает параметры оптико-электронной системы более полно, чем величина разрешающей способности при определенном уровне контраста. Наибольшее распространение получил метод измерения ЧКХ на основе оценки параметров наклонной границы объекта (перепада уровня сигнала), описанный в стандарте ISO 12233. Для анализа была использована тестовая таблица на рис. 2.

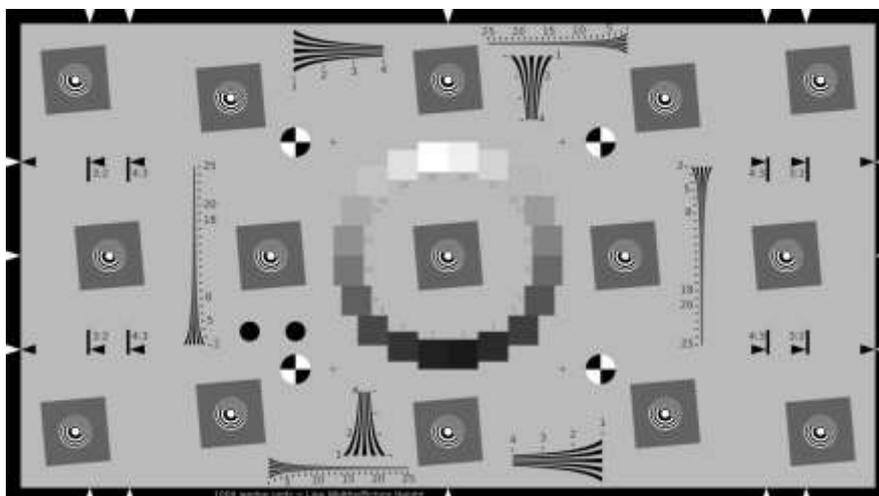


Рис.2. Тестовая таблица.

В соответствии с ISO 12233 угол наклона объектов базового изображения составил  $5^\circ$ , контраст 4:1. Для анализа был выбран упрощенный вариант «клина», показанный на рисунке 3, он имеет разрешение 1024x1024. Результатом анализа его значения ЧКХ является график на рисунке 4.



Рис.3. Выбранная часть изображения из тестовой таблицы.

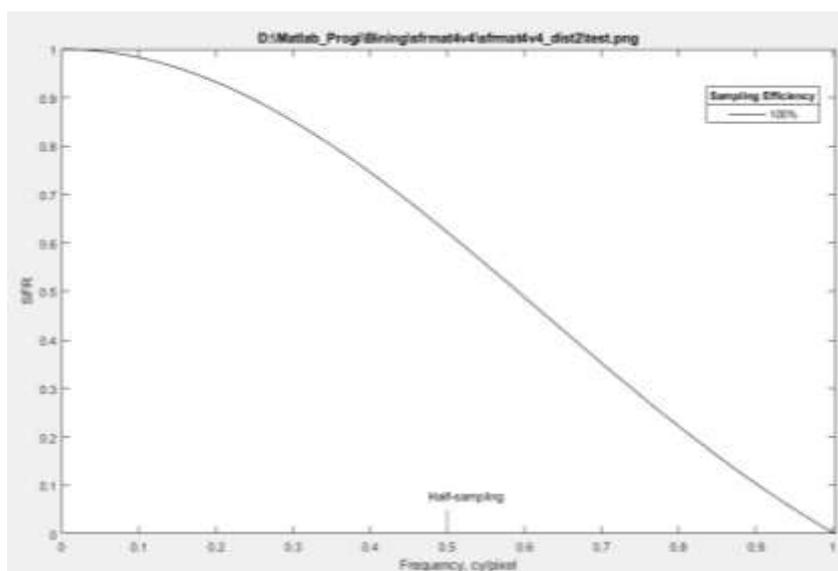


Рис.4. Результат работы программы по определению ЧКХ(SFR).

Для значения ЧКХ выбирается значение на половине частоты отсчетов. Если выбрать эти значения для различных значений масштаба для различных алгоритмов то получится зависимость показанная на графике на рисунке 5. Были созданы аппроксимирующие прямые, которые должны показать более детально поведение распределения значений для каждого алгоритма на рисунках 4-5. Данные были сведены в табл. 1.

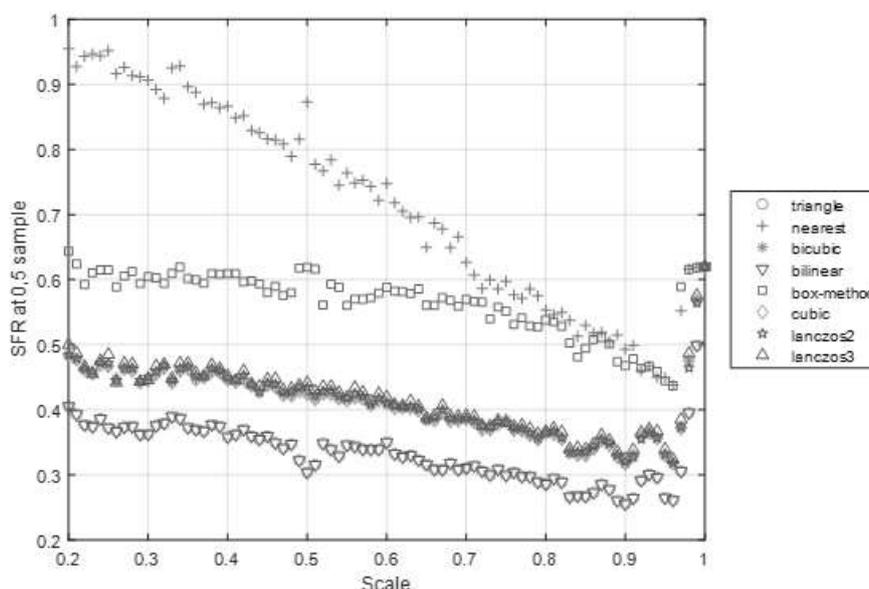


Рис.5. График зависимости ЧКХ от коэффициента масштабирования.

Таблица 1

**Значения аппроксимирующих прямых типа  $kx+b$**

Метод	График СКО		График ЧКХ	
	<b>k</b>	<b>b</b>	<b>k</b>	<b>b</b>
Билинейный	5,56	-0,05	-0,1	0,39
Ближайшего соседа	0,01	8,05	-0,65	1,1
Бикубический	6,67	-0,01	-0,13	0,49
Ланцоша-2	6,68	-0,01	-0,14	0,49
Ланцоша-3	7,24	0,01	-0,13	0,5
«Box»	8,63	-0,01	-0,15	0,65

По графику ЧКХ (рис.5) видно, что лучшими характеристиками обладает метод ближайшего соседа, однако он имеет худшие характеристики СКО. Следующий метод, который имеет хорошие характеристики по ЧКХ — это box- метод, также этот метод имеет самое высокое значение наклона  $K$  относительно всех остальных методов по СКО. Отсюда можно сделать вывод что лучшими характеристиками обладает box-метод.

**Список литературы**

1. <https://www.baslerweb.com/ru/produkty/kamery/matrichnye-kamery/ace2/beyond-features/pixel-beyond/> (дата обращения 25.04.2022)
2. Рудникович А.С., Шипунова К.В., ISO 12233 и программные средства измерения частотно-контрастных характеристик изображений // GraphiCon. 2018. — 261 с.
3. BS ISO 12233:2017. Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses. BSI Standards Publications. Third edition 2017-01. 62 с.

## PIXEL APERTURE OPTIMIZATION FOR DOWNSAMPLE ALGORITHM

A.M. GRINEV, R.S SIRY

<sup>1</sup>*Department of Television and Video Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», St. Petersburg, Russia*

**Annotation.** The paper proposes a technique for creating an interpolator to optimize the optical system and photodetector, and considers the pixel scaling configuration of the 3/2 sensor.

*Keywords:* machine vision, optimization of optical systems, interpolators.

Currently, due to the increase in the number of optical sensor formats, the problem considered in [1] related to the optimization of the hardware configuration in machine vision systems, namely the mutual optimization of the optical system and the photodetector, is becoming more acute. The solution is to create a virtual pixel of the required dimensions required for the correct operation of the optical system.

To determine the values of pixels of new sizes, interpolators are used that affect the quality of the aperture of the resulting pixel, the characteristics of the CFC, PFC and SNR. Based on the work [1], common interpolation methods do not provide a signal-to-noise ratio suitable for further use, as well as an approximation of the frequency response and frequency response to the same characteristics of a pixel of the same physical size. Accordingly, the result of using most interpolators is not sufficient for use in machine vision.

There is a CMTF interpolator [2] that guarantees the necessary frequency response for machine vision by using the function of minimizing the specified constraints, its main feature is to ensure a constant frequency response when scaling. But, the main disadvantage of CMTF when adjusting pixel sizes is the calculation of weight coefficients for each image, therefore, it has low resource efficiency compared to linear interpolators. Since MTF adapts to a specific scaling ratio, its use is too excessive for solving hardware configuration optimization problems due to their finite number and the use of a constant scaling ratio for each system.

That's so, a method for calculating and evaluating the interpolator for recalculating the pixel length 3 in 2 is proposed:

Step 1. Determination of the input signal simulating a continuous image in terms of level and counts.

The role of the signal used is a sample consisting of a set of random samples, the amount sufficient to provide the necessary averaging (Fig. 1). In a real system, there are no sharp changes in the values of adjacent pixels, therefore, in order to prevent significant deviations of the model, the generation of samples is limited by the limit values of spatial frequencies. To simulate a continuous signal in coordinates and values, cubic interpolation is applied to the received samples (Fig. 2).

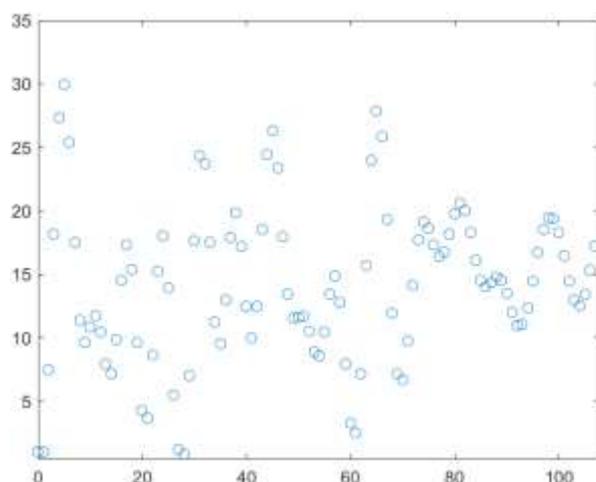


Fig.1 Values of randomly generated samples.

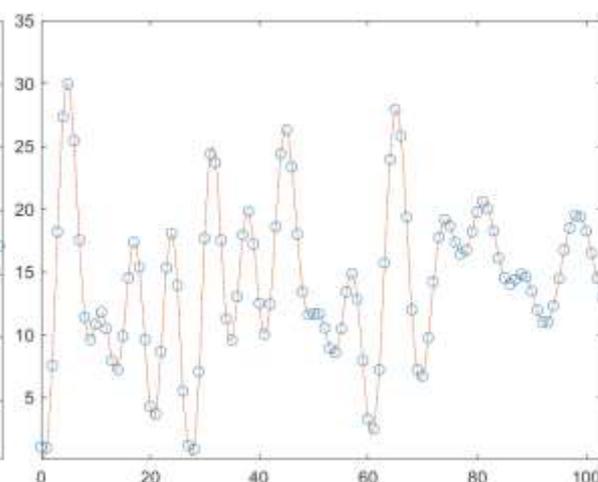


Fig.2 Interpolated values of samples.

Step 2. Getting the values of a single and one and a half pixels.

By integrating the received signal over single and one-and-a-half segments, the values of the original and desired «reference» pixels are calculated. In this way, the image formation is simulated by a machine vision system with different pixel sizes (Fig. 3).

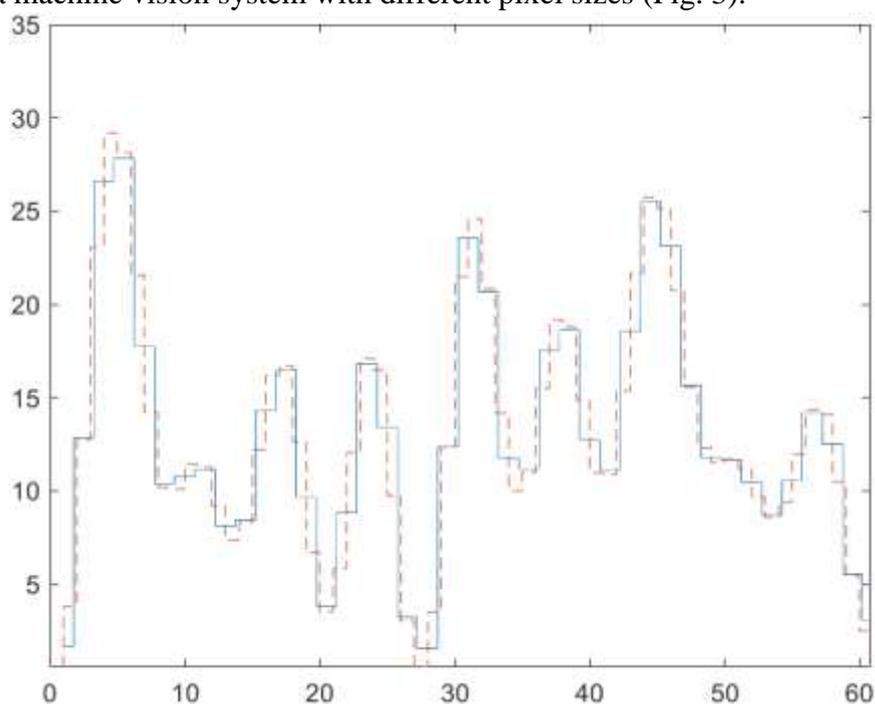


Fig.3 Integrated values of one-and-a-half (continuous line) and single (dotted line) pixels.

Splitting the resulting one-and-a-half pixels into types is advisable to reduce the variance of the analytically obtained pixel level from the «reference» value. When converting 3 to 2, the final image is composed alternately of pixels of one and a half lengths from the original two types, «A» and «B», respectively. The center of the «A» pixel is located on the border of two original pixels and overlaps 0.75 of the length of each, the center of the «B» pixel coincides with the center of the original and overlaps 0.25 of the length of neighboring pixels, requiring the values of three adjacent pixels for its calculation(Fig. 4).

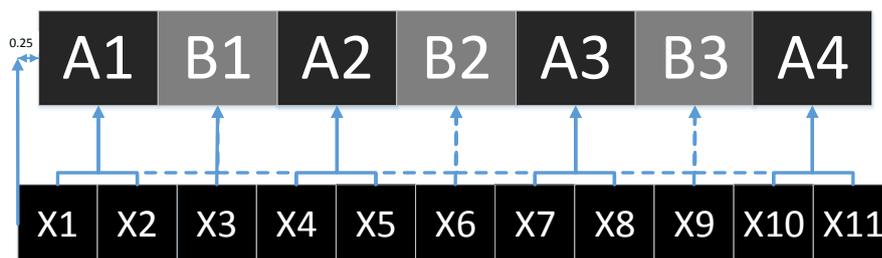


Fig.4 Location and dependence of one-and-a-half pixels of different types on single pixels.

Step 3. Calculation of the coefficients of dependence of one and a half and single pixels.

To calculate the coefficients of the aperture dependence of the desired pixels of each type on a different number of primitive pixels, the least squares method is used. With its help, an equation of the form  $AxC = B$  is solved, in which «A» is an array of values of single pixels of dimension «m» by «n», where «m» is the number of pixels received, and «n» is the number of single pixels on which the desired pixel depends. «B» is an array of reference values of one-and-a-half pixels of dimension «m» by 1. The desired array of coefficients «C» is calculated with an error, to eliminate which the values of the coefficients are averaged over several samples.

Weight coefficients were calculated for different types of pixels with different masks. So for «A» pixel, coefficients for masks with a dependence on two, four, six single pixels were found. For «B» pixels, coefficients were found for masks with a dependence of three, five and seven pixels, respectively. Similarly, the coefficients were calculated when the center of the aperture was shifted by 0.25 of the length of a single pixel to the right (Table 1).

Table 1

CA2	CA4	CA6	Shift CA2	Shift CA4	Shift CA6	Dependence of the i-th pixel A on X
		0,0116			0,0397	$X(3*(i-1)-1)$
	-0,0427	-0,0652		-0,0584	-0,0976	$X(3*(i-1))$
0,5028	0,5402	0,5474	0,259	0,307	0,3061	$X(3*(i-1)+1)$
0,5014	0,5534	0,5736	0,7498	0,7992	0,8036	$X(3*(i-1)+2)$
	-0,0513	-0,0843		-0,0557	-0,0991	$X(3*(i-1)+3)$
		0,0173			0,0471	$X(3*(i-1)+4)$
CB3	CB5	CB7	Shift CB3	Shift CB5	Shift CB7	Dependence of the i-th pixel B on X
		0,0001			-0,0466	$X(3*i-3)$
	0,001	0,0009		0,0596	0,0844	$X(3*i-2)$
0,0503	0,0472	0,0472	-0,0841	-0,1062	-0,1184	$X(3*i-1)$
0,8994	0,9026	0,9036	0,8253	0,8242	0,824	$X(3*i)$
0,0503	0,0472	0,0473	0,2579	0,284	0,2985	$X(3*i+1)$
	0,001	0,0009		-0,0622	-0,0871	$X(3*i+2)$
		0,0001			0,0448	$X(3*i+3)$

Step 4. Evaluation of the results obtained.

The main evaluation criterion is the ratio of the adjusted pixel level to the «reference» value, when the same continuous signal in brightness and coordinates is applied to them. The modulus

of the difference between the unit and the resulting ratio multiplied by one hundred percent is the deviation of the value calculated using weighting coefficients from the reference. When applying the considered method, the maximum deviation was less than one percent.

### List of literature

1. Ellis Freedman, Robert Fleming. The Constant MTF Interpolator a resampling technique with minimal MTF losses. 16657689, DOI: 10.1109/SPMB.2016.7846878
2. Pavel S. Baranov, Andrey A. Mantsvetov, Ruslan S. Siryi. Comparative Analysis of Downsample Algorithms for the Method of Forming Images with a Virtual Pixelю DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755636, 2022

## АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА СИГНАЛА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. С. ЕЛЬЦОВ

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

**Аннотация.** Основной задачей работы АИС является обмен информации между станциями, установленными на крупных судах. В статье описываются принципы работы и особенности алгоритмов приема сигнала. Содержатся примеры моделирования в пакете прикладных программ MATLAB.

**Ключевые слова:** АИС, GMSK, квадратурная модуляция, обнаружитель сигнала, NRZI-кодирование.

Развитие судоходства и торговых отношений среди стран повлекло за собой появление проблем с координацией для избежания столкновений. В связи с этими обстоятельствами Международная ассоциация морских средств навигации и управления маяками в 1996 году подготовила проект, положивший начало разработки автоматической идентификационной системы.

АИС (Автоматическая идентификационная система) — система в судоходстве, служащая для идентификации судов, их габаритов, курса и других данных с помощью радиоволн диапазона.

Автоматическая станция АИС работает в УКВ-диапазоне на несущей частоте 162,025 МГц в полосе частот 25 кГц в открытых водах и на несущей частоте 161,975 МГц и полосе частот 12,5 кГц в территориальных [1]. При сильной загруженности одного канала может быть использован и второй вне зависимости от того, где находится станция АИС. В идеальных условиях передача сигнала происходит на расстояния до 30 морских миль, хотя на практике дальность действия не превышает 20 миль. Кроме необходимой дальности действия УКВ-диапазон был выбран за его возможность огибать некоторые препятствия, что полезно в условиях передачи у береговой зоны. За возможность передачи информации в узкой полосе частот, было решено использовать Гауссовскую частотную модуляцию с минимальным сдвигом (GMSK).

Передача информации в системе АИС происходит посредством множественного доступа с разделением по времени (TDMA). Суть данного метода заключается в передаче данных от нескольких источников информации на один приемник в одном частотном интервале в разные временные интервалы. Каждый временной интервал, занимаемый одной станцией АИС, называется слот. Слоты группируются во фреймы. Каждый фрейм имеет длительность в 1 минуту.

Разделение на фреймы необходимо для работы станций АИС независимо от постоянного оператора, руководящего передачей данных. Это часть алгоритма частного случая TDMA, а именно самоорганизующегося многостанционного доступа с временным разделением. При такой передаче станции АИС заранее сообщают о том, какой слот они будут занимать в следующем фрейме. Это также позволяет всем взаимодействующим станциям заранее определить свободные слоты. Для этого станции формируют «карту слотов», в которой записывается последняя минута передаваемой информации. Судна по очереди передают информацию о себе, и, кроме этого, отправляют информацию о следующем времени передачи пакета, тем самым резервируя это время под себя.

Каждый фрейм содержит в себе 2250 слотов, длящиеся по 26,67 мс. Скорость передачи информации в системе АИС составляет 9600 бит/с. Таким образом в одном слоте возможна передача 256 бит. Однако в первые 8 бит оставляются на выход передатчика на заданный режим, в этот момент передача не передается, а также последний 24 бита являются буфером, необходимый для избегания наложения сигналов из-за задержки расстояния и дрожания синхронизации. В остальные же биты умещается вся передаваемая информация, включая положение корабля, его статус, курс, скорость и уникальный номер. Также структура сообщения имеет в себе обучающую 24-битную последовательность из нулей и единиц, две восьмибитные последовательности 01111110, являющиеся запускающим и конечным флагами, а также последовательность проверки системы координат для контроля циклическим избыточным кодом.

Кроме алгоритма демодуляции АИС сигнала для тестирования алгоритма демодуляции в пакете MATLAB был написан и алгоритм модуляции.

Модуляция GMSK сигнала состоит из нескольких этапов:

- перевод данных в двоичный код;
- NRZI-кодирование;
- прохождение сигнала через фильтр Гаусса;
- квадратурная модуляция.

Двоичная последовательность данных кодируется с помощью алгоритма NRZI. Основной идеей алгоритма заключаются в следующем: пока в двоичной последовательности нынешний бит такой же, как и предыдущий, это бит обозначается как «0». Если же нынешний бит отличается от предыдущего, обозначается с помощью «1».

После NRZI-модулирования происходит сглаживание импульсов сигнала путем прохождения их через фильтр Гаусса. Фильтр, имеющий форму импульса гауссовой формы, является ключевым элементом для генерации сигналов GMSK, которые имеют компактный спектр мощности по сравнению с MSK. В соответствии со спецификацией AIS использует фильтр с форм-фактором импульсов Гаусса с  $BT = 0,5$ .

Финальным шагом перед передачей сигнала является квадратурная модуляция (рис. 1). При квадратурной модуляции после прохождения последовательности через фильтр нижних частот, сигнал поступает на интегратор. Сигнал интегрируется по времени, тем самым получая фазу. Ее синус и косинус высчитываются для получения Q и I фазовых составляющих сигнала соответственно [2].

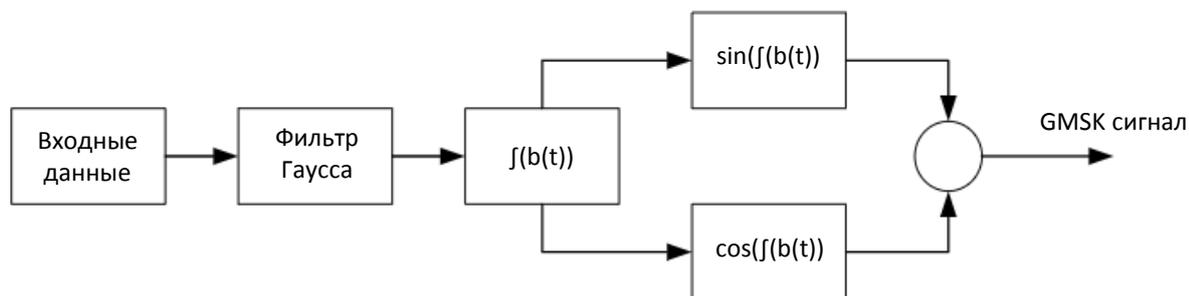


Рис. 1. Алгоритм квадратурной модуляции сигнала.

Структура сигнала АИС подразумевает, что возможны промежутки времени, когда сигнал на несущих частотах не передается. Для оптимизации работы демодулятора может быть внедрен обнаружитель сигнала. Он будет работать на основе того, что последовательность первых 32 бит (флаг старта и обучающая последовательность) неизменна, а следовательно, имеется известный сигнал, который необходимо обнаружить.

Имея, полученный сигнал и сигнал, который должен был быть принят, возможна проверка с помощью взаимной корреляционной функции (ВКФ). Получив ВКФ двух сигналов, ее можно сравнить с автоматической корреляционной функцией идеального сигнала в пороговом устройстве. Если разница между КФ считается незначительными в нулевой задержке, то можно считать, что это первые биты ожидаемого сигнала станции АИС, а следовательно, запускается процесс демодуляции.

Демодуляция в общих своих чертах представляет из себя модуляцию в обратном порядке. После принятия сигнала происходит его демодуляция (рис.2). В основе демодулятора GMSK сигнала лежит частотный детектор. Идеальный частотный детектор состоит из дифференциатора и фильтра нижних частот. Процесс демодуляции происходит следующим образом:



Рис. 2. Блок-схема демодулятора GMSK сигнала.

Принятый сигнал пропускается через полосовой фильтр с достаточной шириной полосы пропускания, чтобы пропустить нижнюю и верхнюю боковые полосы и устранить внеполосные помехи. Первым этапом процесса демодуляции в GMSK является дифференциация. Исходный сигнал сообщения пропорционален разности фаз последовательных выборок данных.

Сигнал фильтруется с помощью фильтра Баттерворта с частотой среза чуть выше половины частоты одного символа. Желательно использовать фильтр с высоким порядком, чтобы избежать появления межсимвольных помех в приемнике, в данном случае был использован фильтр четвертого порядка.

Отфильтрованному сигналу необходимо убрать постоянную составляющую. Для этого находятся максимальное и минимальное значения сигнала, а затем вычитается из каждого элемента массива данных максимальное значение, после чего прибавляется разница между максимальным и минимальным, поделенная пополам.

Полученный массив необходимо децимировать. Данная операция легко выполняется ввиду того, что известна частота дискретизации и длительность каждого бита. Во время децимации важно выбирать отсчёт посередине бита, так как именно там максимальная амплитуда отсчётов после прохождения через фильтр Гаусса.

Восстановленные символы после дециматора наконец проходят через NRZI-декодер. Выполнение NRZI-декодирования происходит следующим образом: в случае если нынешний символ равен предыдущему, на декодер записывается «1», если символы не совпадают, то записывается «0».

Для проверки правильности используется проверочный код CRC длиной 16 бит. Этот код образуется в процессе обработки принятых данных. Если сформированное значение кода совпадает с принимаемым кодом, то данные приняты безошибочно.

Итогом работы стал анализ работы системы при различных шумовых искажениях, возникающих в момент передачи сигнала с модулятора на демодулятор. В качестве искажений выбран аддитивный белый гауссовский шум. Был взят диапазон отношения сигнал/шум от 0 до 8 дБ с шагом 0,5 дБ. Для каждого соотношения было проведено 1000 итераций, на которых фиксировалось совпадение зашумленного декодированного сигнала с исходным.

Результаты сведены в график на рис. 3, из которого видно, что при отношении сигнал/шум=6 дБ, сигнал будет гарантированно декодирован, при отношении 5,5 дБ возникают ошибки (0,2 %), дальнейшее же увеличение шума резко уменьшает вероятность правильного приема сигнала.

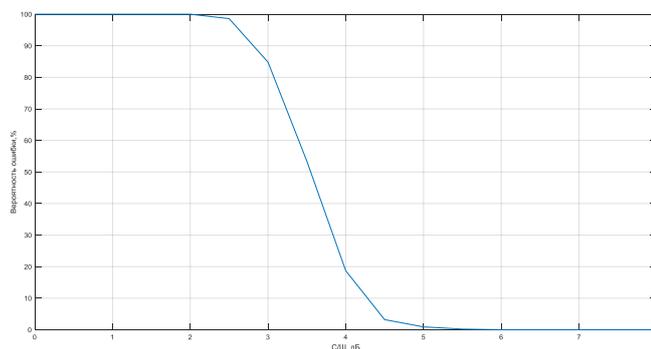


Рис. 3. График отношения вероятности ошибки демодулятора к отношению сигнал/шум.

### Список литературы

1. IALA, «Operational issues.» in IALA Guideline No. 1028 on The Automatic Identification System (AIS), vol. 1 of Part I, Edition 1.3, IALA, December 2004.
2. Сергиенко А. Б. Цифровая связь: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СЗ2 СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. 164 с.
3. Прокис Джон Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. — М.: Радио и связь. 2000. — 800с.: ил.

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ СИНФАЗНО-ПРОТИВОФАЗНЫЙ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ НА ИСКУССТВЕННЫХ ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ В ИНТЕГРАЛЬНОМ ИСПОЛНЕНИИ

И.Н. РЫЖМАН, Д.В. Холодняк

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

**Аннотация.** Рассматривается возможность миниатюризации синфазно-противофазного направленного ответвителя (НО) путем замены отрезков длинных линий, входящих в состав устройства, на искусственные длинные линии (ИДЛ) на элементах с сосредоточенными параметрами. Показано, что для обеспечения частотных характеристик, близких к характеристикам традиционного кольцевого НО, достаточно использовать ИДЛ на основе всего двух элементарных ячеек на четверть рабочей длины волны. Обсуждаются преимущества реализации НО на ИДЛ в интегральном исполнении. Представлена конструкция и результаты электродинамического моделирования частотных характеристик малогабаритного НО, который занимает в 14 раз меньшую площадь подложки по сравнению с традиционным аналогом.

**Ключевые слова:** направленные ответвители, искусственные длинные линии, миниатюризация.

### Введение

Для деления и сложения мощности в схемах балансных СВЧ-устройств (усилителей, смесителей и т.п.) применяют синфазно-противофазные направленные ответвители (НО), имеющие форму кольца, которое образовано тремя четвертьволновыми отрезками длинных линий (ДЛ) и одним отрезком линии длиной в три четверти длины волны [1]. Таким образом, периметр кольца составляет 1,5 длины волны на центральной частоте. Чем ниже рабочая частота, тем больше длина волны и, соответственно, больше размеры НО. Так, на частоте 1 ГГц четвертьволновый отрезок микрополосковой линии (МПЛ) на подложке с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3,55$  имеет длину 45 мм, периметр кольцевого НО равен 270 мм, а занимаемая им площадь составляет около 5800 мм<sup>2</sup>.

Размеры НО могут быть существенно уменьшены путем замены отрезков ДЛ, входящих в его состав, искусственными длинными линиями (ИДЛ) на элементах с сосредоточенными параметрами. В работе представлены результаты разработки малогабаритного кольцевого НО на ИДЛ в полностью интегральном исполнении. Разработанный НО занимает в 14 раз меньшую площадь по сравнению с НО на отрезках ДЛ с распределенными параметрами, выполненным на такой же подложке, и имеет схожие с ним частотные характеристики (ЧХ).

### Искусственные длинные линии

ИДЛ представляют собой периодические структуры в виде каскадного соединения Т- или П-образных ячеек из элементов с сосредоточенными параметрами (рис. 1). При определенных условиях ИДЛ эквивалентна отрезку однородной ДЛ с распределенными параметрами. Минимально необходимое число элементарных ячеек в составе ИДЛ зависит от того, в какой полосе частот и с какой точностью ЧХ ИДЛ должны быть эквивалентны ЧХ отрезка ДЛ.

По заданным значениям волнового сопротивления ( $Z_0$ ) и электрической длины отрезка ДЛ ( $\theta_0 \leq 90^\circ$ ) параметры элементарных ячеек ИДЛ рассчитываются по формулам [2]:

$$L_T = Z_0 / \omega_0 \tan |\theta_0 / (2n)|, \quad C_T = (\omega_0 Z_0)^{-1} \sin |\theta_0 / n|,$$

$$L_{\Pi} = Z_0 / \omega_0 \sin |\theta_0 / n|, \quad C_{\Pi} = (\omega_0 Z_0)^{-1} \tan |\theta_0 / (2n)|,$$

где  $L_T$ ,  $L_{\Pi}$ ,  $C_T$  и  $C_{\Pi}$  — индуктивности и емкости Т- и П-ячейки соответственно,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  — круговая центральная частота,  $n$  — число элементарных ячеек ИДЛ. Поскольку расчет производится для центральной частоты  $f_0$ , на которой достигается целевое значение  $\theta_0$ , то при отстройке от  $f_0$  характеристики ИДЛ будут отличаться от характеристик отрезка ДЛ с распределенными параметрами. Эти отличия будут тем заметнее, чем больше отстройка по частоте, чем выше значение  $\theta_0$ , и чем меньше элементарных ячеек в составе ИДЛ (Рис. 2).

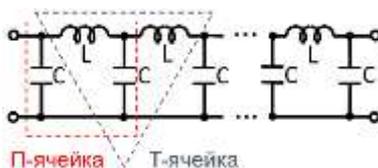


Рис. 1. ИДЛ как периодическая структура, состоящая из Т- или П-образных элементарных ячеек.

Примем, что ЧХ ИДЛ считаются эквивалентными ЧХ отрезка ДЛ с распределенными параметрами, если отклонение модуля коэффициента отражения  $|S_{11}|$  не превышает 0,1 (что соответствует  $-20$  дБ), а отклонение фазы коэффициента передачи  $\arg(S_{21})$  не превышает  $\pm 10\%$ . Согласно этим критериям, полоса частот, в которой ЧХ одиночной элементарной ячейки эквивалентны ЧХ отрезка ДЛ с  $\theta_0 = 90^\circ$ , ограничена  $\pm 10\%$  от значения  $f_0$ . В то же время рабочая полоса частот ИДЛ, состоящей из двух каскадно соединенных ячеек, простирается от нуля до  $2f_0$ . Дальнейшее увеличение числа элементарных ячеек в составе ИДЛ лишь незначительно расширяет рабочую полосу частот, но приводит на практике к заметному увеличению занимаемой площади и вносимых потерь, вызванных конечной добротностью реальных индуктивных и емкостных элементов. Таким образом, для разработки малогабаритного кольцевого НО достаточно использовать ИДЛ, у которых на четверть рабочей длины волны приходится две элементарные ячейки.

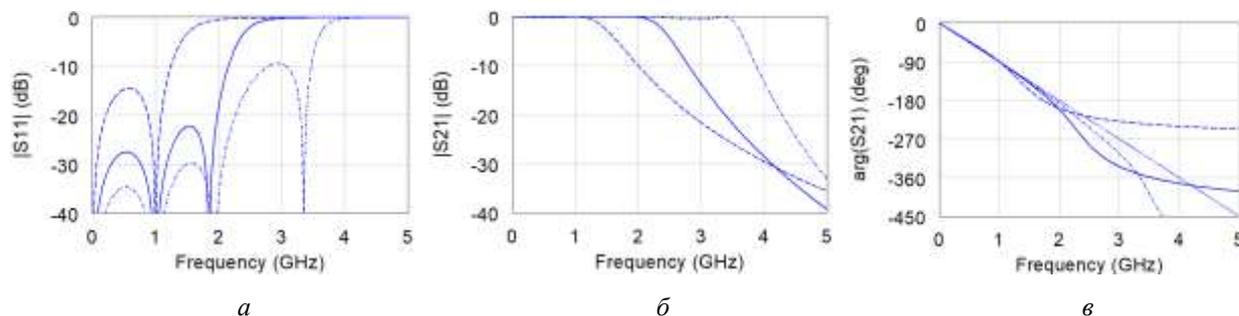


Рис. 2. Частотные характеристики ИДЛ с параметрами  $Z_0 = 50$  Ом и  $\theta = 90^\circ$ , состоящей из одной П-образной ячейки (штриховые линии), двух (сплошные линии) и трех (штрих-пунктир) каскадно соединенных ячеек: (а) модуль коэффициента отражения, (б) модуль коэффициента передачи, (в) фаза коэффициента передачи. Пунктиром показана фаза коэффициента передачи отрезка идеальной ДЛ.

Практическая реализация ИДЛ может быть осуществлена как на компонентах поверхностного монтажа (КПМ), так и на квазисосредоточенных LC-элементах в интегральном исполнении. К преимуществам интегрального исполнения можно отнести: более высокую точность реализации целевых значений LC-элементов и меньший

разброс их параметров; отсутствие переходных металлизированных отверстий для организации параллельного включения конденсаторов ИДЛ; отсутствие операций по установке и пайке КППМ.

На Рис. 3(а) показана топология ИДЛ с параметрами  $Z_0 = 71$  Ом и  $\theta = 90^\circ$  на базе двух П-образных элементарных ячеек в интегральном исполнении. Последовательные индуктивности  $L_{\Pi} = 7,96$  нГн выполнены в виде узких отрезков МПЛ, свернутых для компактности в меандр. Ширина линий и зазоров между ними составляет 200 мкм. Заземленные емкости  $C_{\Pi} = 0,93$  пФ реализованы в виде плоскопараллельных конденсаторов, верхние электроды которых представляют собой прямоугольные участки металлизации, а в качестве нижних электродов выступает заземленный экран МПЛ.

Предварительный расчет геометрических размеров интегральных LC-элементов осуществлялся по формулам из [3]. Впоследствии топология ИДЛ корректировалась до совпадения ЧХ, полученных при помощи численного электродинамического моделирования в программном пакете Cadence AWR Microwave Design Environment, с ЧХ эквивалентной схемы ИДЛ, как показано на Рис. 3(б)-(в). ИДЛ реализована на подложке толщиной 0,508 мм из ламинированного диэлектрика Rogers 4003 с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3,55$ , тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}(\delta) = 0,0021$  и толщиной металлизации  $t = 17$  мкм. Габаритные размеры реализованной ИДЛ составляют  $8,8 \times 6,3$  мм, что примерно соответствует  $1/20 \times 1/28$  длины волны. Таким образом, физическая длина ИДЛ в пять раз короче традиционного четвертьволнового отрезка ДЛ.

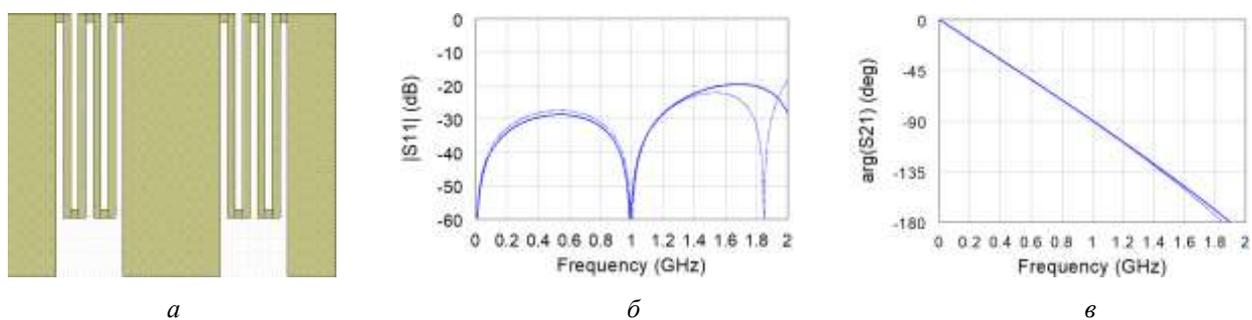


Рис. 3. ИДЛ с параметрами  $Z_0 = 71$  Ом и  $\theta = 90^\circ$  на основе двух П-образных ячеек: (а) топология, (б) модуль коэффициента отражения, (в) фаза коэффициента передачи. Сплошными линиями показаны результаты электродинамического моделирования, пунктиром — результаты схематехнического моделирования.

### Малогабаритный направленный ответвитель

На основе шести одинаковых секций ИДЛ была разработана топология кольцевого НО (рис. 4). Устройство имеет размеры  $22,9 \times 17,6$  мм ( $1/8 \times 1/10$  длины волны) и занимает площадь  $403$  мм<sup>2</sup>, что в 14 раз меньше по сравнению с традиционным кольцевым НО.

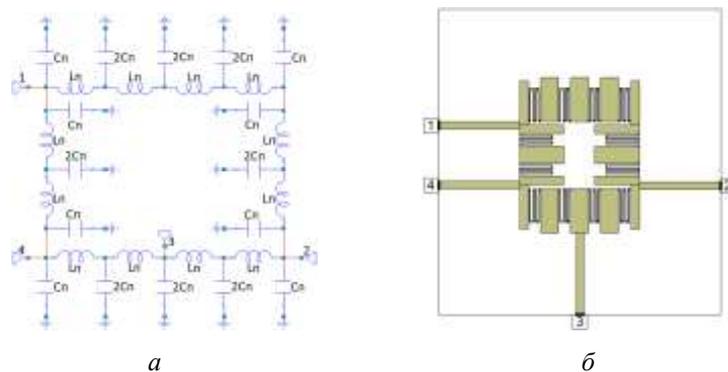


Рис. 4. Кольцевой НО на ИДЛ на основе двух  $\Pi$ -образных элементарных ячеек: (а) схема, (б) топология.

ЧХ НО в синфазном и противофазном режимах представлены на Рис. 5. Результаты численного электродинамического моделирования в целом хорошо совпадают с данными схмотехнического моделирования. Незначительный сдвиг характеристик отражения и развязки в разные стороны относительно  $f_0$  обусловлен паразитными связями между близкорасположенными секциями ИДЛ. Сдвиг характеристик приводит к тому, что ширина рабочей полосы частот НО, определяемая по уровню входного коэффициента отражения  $-20$  дБ и развязки выходных плеч  $20$  дБ, оказывается несколько меньше, чем при схмотехническом моделировании, которое не учитывает влияние паразитных связей. Тем не менее, рабочая полоса частот НО по результатам электродинамического моделирования составляет  $27\%$  в противофазном режиме и  $23\%$  в синфазном режиме. В рабочей полосе частот обеспечивается равное деление мощности между выходными плечами с точностью  $-0,7/+0,4$  дБ, а разбаланс фаз выходных сигналов не превышает  $12,5/+10,5^\circ$  в противофазном режиме и  $\pm 5,0^\circ$  в синфазном режиме. Вносимые потери на центральной частоте составляют около  $0,3$  дБ, что сопоставимо с потерями в традиционном кольцевом НО на такой же подложке.

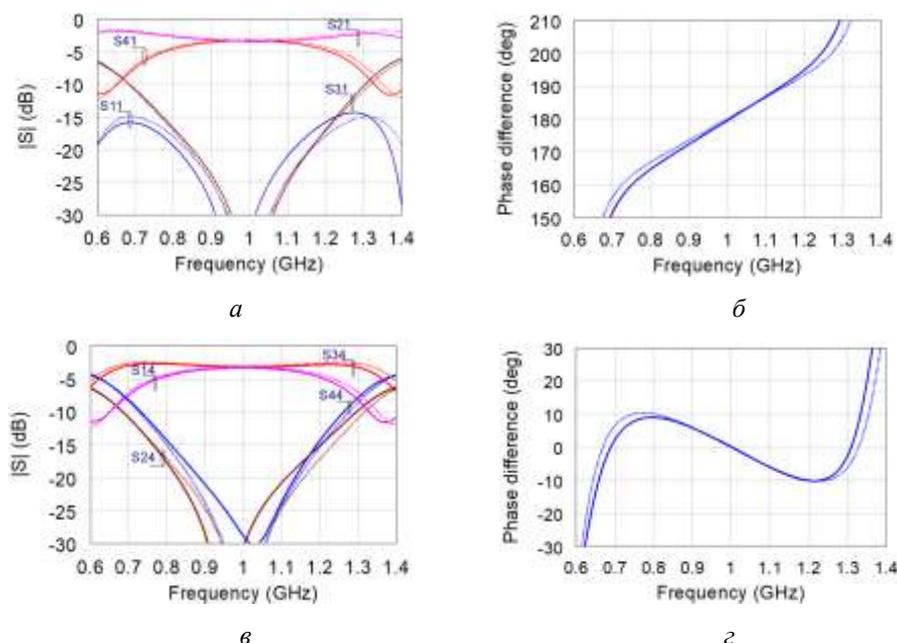


Рис. 5. АЧХ и разность фаз волн в выходных плечах разработанного малогабаритного НО, полученные при помощи электродинамического моделирования (сплошные линии) и схмотехнического моделирования (пунктир): (а) и (б) противофазный режим, (в) и (г) синфазный режим.

### **Заключение.**

С использованием ИДЛ на основе двух каскадно соединенных П-образных элементарных ячеек разработан малогабаритный синфазно-противофазный НО с центральной частотой 1 ГГц. Устройство реализовано в микрополосковом исполнении без применения КПМ и переходных металлизированных отверстий. Как показало схемотехническое моделирование, для получения ЧХ близких, к ЧХ традиционно кольцевого НО, в составе ИДЛ достаточно использовать две элементарные ячейки на четверть длины волны. По результатам электродинамического моделирования рабочая полоса частот разработанного НО меньше теоретической, и составляет от 23 до 27% в зависимости от режима работы. Небольшое сужение рабочей полосы частот является «платой» за миниатюризацию НО. При этом выигрыш по площади, занимаемой устройством, достигает 14 раз в сравнении с традиционным кольцевым НО.

### **Список литературы**

1. Turalchuk P. Broadband small-size LTCC directional couplers / P. Turalchuk, I. Munina, P. Kapitanova, D. Kholodnyak et al. // Proc. of 40th European Microwave Conference. — 2010, Paris, France. — P. 1162-1165.
2. Kholodnyak, D. V. Metamaterial transmission lines and their applications / D. V. Kholodnyak. — Proc. Of 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. — 2017, St. Petersburg and Moscow, Russia. — P. 3-8.
3. Bahl I. Lumped elements for RF and microwave circuits. — Artech House: 2003.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХРАЗЯДНОГО КАЛЬКУЛЯТОРА ДВОИЧНЫХ ЧИСЕЛ**

К. С. САЛУВАВА

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

**Аннотация.** Данная работа посвящена разработке и моделированию схемы четырехразрядного цифрового калькулятора, позволяющего выполнять операции сложения, вычитания и умножения двоичных чисел. Она содержит подробную информацию о логических элементах и интегральных схемах, включая их характеристики и принципы работы. Обоснован выбор программного САПР Proteus для проектирования моделирования схем. Разработаны методические указания для выполнения задачи. Разработаны методы логических построения в Proteus для изучения работы математических операций.

**Ключевые слова:** *Proteus, арифметическое устройство, счетчик, дешифратор, мультиплексор, система двоичных числений, одноразрядный сумматор, четырехразрядный полный сумматор и умножитель, семисегментный индикатор.*

Мир информационных и коммуникационных технологий сегодня переживает революцию в области автоматизации, заставляющую автоматизировать все, что раньше было ручным и аналоговым. Конструирование и моделирование электронных устройств является неотъемлемой частью этой технологической революции. В настоящее время это возможно с помощью комбинаций логических схем (логических элементов, интегральных схем и программируемых схем, таких как микроконтроллеры и Arduino) создавать эти электронные устройства. Но для реализации этих проектов потребовались бы большие затраты из-за сложности его конструкции и удовлетворения потребности в приобретении

этих материалов. По этой причине в настоящее время одной из проблем в наших лабораторных помещениях является использование старых цифровых моделей.

Поэтому для оптимизации и решения этой проблемы, задача данной работы направлена на разработку и моделирование с помощью логических вентилях и интегральных схем цифрового калькулятора двоичных чисел.

В этой работе были предприняты следующие шаги для достижения цели выполнения проекта:

- Изучать, понимать и анализировать литературы, относящуюся к разделам алгебры логических функций и разделам интегральных схем;
- Разработать и моделировать различные функциональные цифровые схемы, такие как счетчик, мультиплексор, буфер с тремя состояниями, сумматор, умножитель, дешифратор и семисегментный индикатор в САПР Proteus;
- Разработать, соединить и моделировать на основе исходных данных цифровую схему функционального калькулятора двоичных чисел в САПР Proteus.

Для реализации и моделирования проекта «цифровой четырехразрядный калькулятор двоичных чисел» была реализована схематическая диаграмма, показывающая, как были соединены все отдельные схемы. После этого его работа будет подробно объяснена.

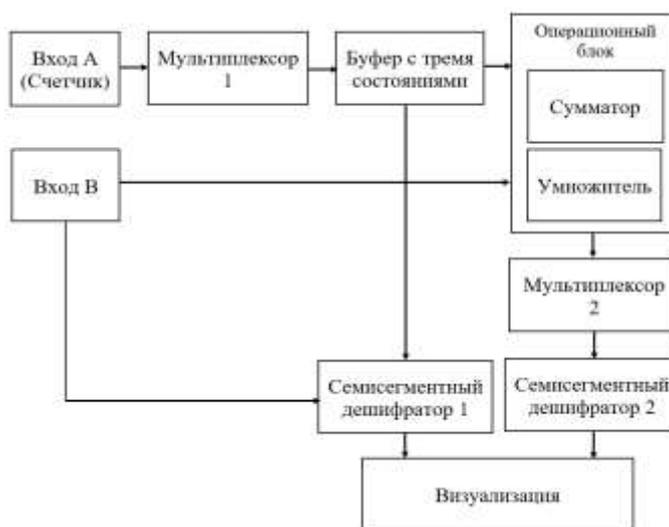


Рис. 1. Схематическая диаграмма четырехразрядного калькулятора.

Как показано на рисунке выше (рис. 1), для входных сигналов есть два четырехразрядных входа (вход А и вход В).

Вход В передает сигнал через 4 кнопки, так как  $2^4=16$ . То есть с числа 0 до числа 15. Этот сигнал поступает непосредственно на операционный блок и на первый семисегментный дешифратор. Это ручной ввод.

На входе А, кроме сигнала, который передается 4 кнопками, так как на входе В, то есть кроме ручного ввода, также разработан счетчик по mod 16, позволяющий передавать автоматические данные. Этот счетчик позволяет нам выполнять математические операции автоматически и быстро, то есть, когда хотим выполнять много операций нескольких чисел на одном входе с одним числом на другом входе. Для построения этого счетчика были использованы четыре асинхронных каскадных D-триггера. Был использован генератор цифровых импульсов для обеспечения первого

тактового импульса на первом триггере, а инвертированный выход этого триггера обеспечивает следующий тактовый импульс на последующем триггере и так далее. Выходные сигналы счетчика (четыре выхода с каждого триггера) были использованы для формирования автоматического ввода входа А.

Частота тактового сигнала равна 2 Гц, что эквивалентно периоду в 0.5 с.

Зная, что на входе А есть два режима передачи данных, необходимо реализовать многоуровневый мультиплексор 2 в 1, чтобы выполнять это переключение передачи данных. Мультиплексор получает этот сигнал со входа А, чтобы выбрать, в каком режиме мы хотим работать. Выбор передачи данных осуществляется с помощью управляющего входа. Когда управляющий вход находится на высоком логическом уровне «1», мультиплексор выбирает автоматический вход со счетчика. Когда управляющий вход находится на низком логическом уровне «0» мультиплексор выбирает ручной ввод с кнопок.

Чтобы сигнал прошел только в одно направление, то есть от входа А к выходу, была реализована схема буфер с тремя состояниями, для предотвращения прохождения нежелательных сигналов с выхода к входу, препятствуя правильной работе счетчика. Выходной сигнал с буфера с тремя состояниями подключается непосредственно к операционному блоку и первому дешифратору в код семисегментного индикатора.

В операционном блоке были разработаны две схемы — четырехразрядный сумматор и умножитель двоичных чисел.

Четырехразрядный сумматор выполняет математические операции сложения и вычитания. Четыре полных сумматора были построены в каскаде, где выходной перенос предыдущего сумматора служит входным переносом последующего сумматора. Для выполнения операции вычитания было использовано сложение по модулю 2 с помощью логических элементов XOR на входе В.

Четырехразрядный умножитель выполняет математическую операцию умножения между входом А и входом В.

Зная, что в операционном блоке есть две схемы и нам нужно передать результат данных отдельно, также необходимо реализовать многоуровневый мультиплексор, чтобы выполнять это переключение передачи данных. Мультиплексор получает этот сигнал от операционного блока, чтобы выбрать, какой из результатов можно просмотреть. Выбор передачи данных осуществляется с помощью управляющего входа. Когда управляющий вход находится на высоком логическом уровне «1», мультиплексор выбирает сигнал, поступающий с умножителя. Когда управляющий вход находится на низком логическом уровне «0» мультиплексор выбирает сигнал, поступающий с сумматора.

Первый семисегментный дешифратор принимает сигналы со входа А и входа В. Второй семисегментный дешифратор принимает сигналы с мультиплексора, то есть выходные сигналы. Оба дешифратора преобразуют принятые двоичные коды в десятичные, поэтому эти десятичные сигналы связаны с блоком отображения, в котором для отображения этих десятичных значений используются семисегментные дисплеи.

На рис. 2 — 4 показаны схемы четырехразрядного калькулятора двоичных чисел. Схема на рис. 2 выполняет операцию «сложение». Схема на рис. 3 выполняет операцию «вычитание». Схема на рис. 4 выполняет операцию «умножение».

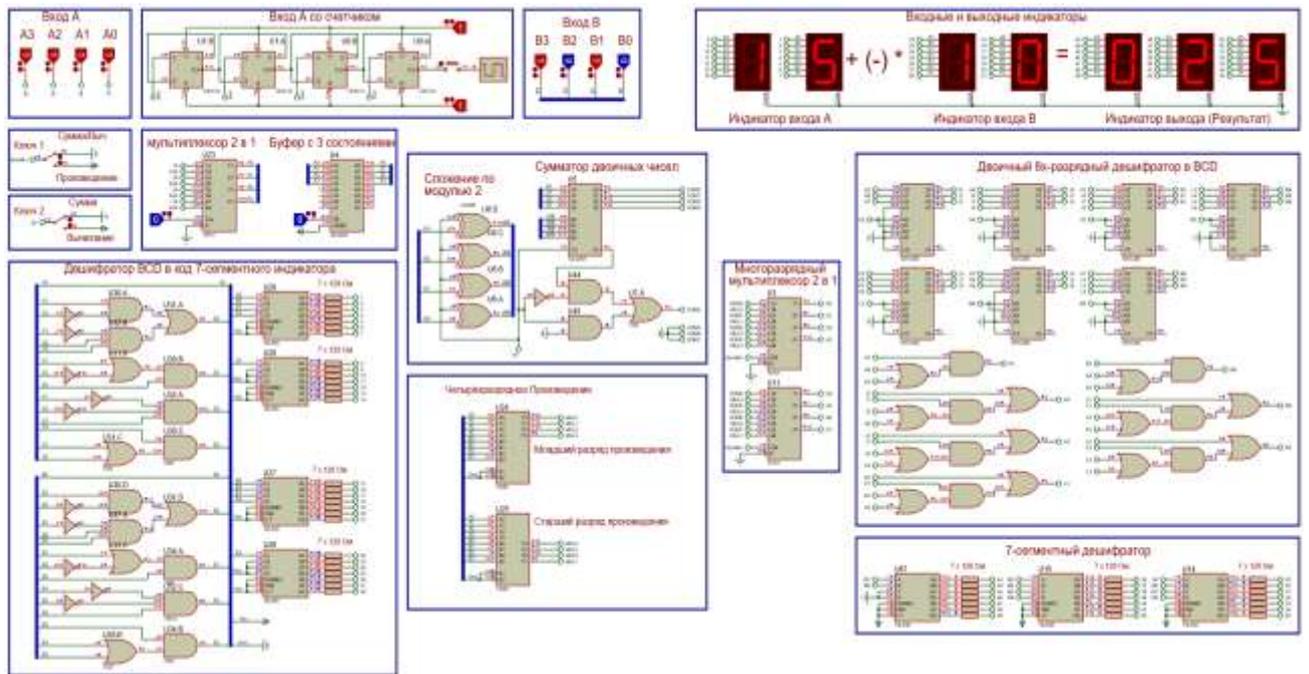


Рис. 2. Схема четырехразрядного калькулятора двоичных чисел (операция сложения).

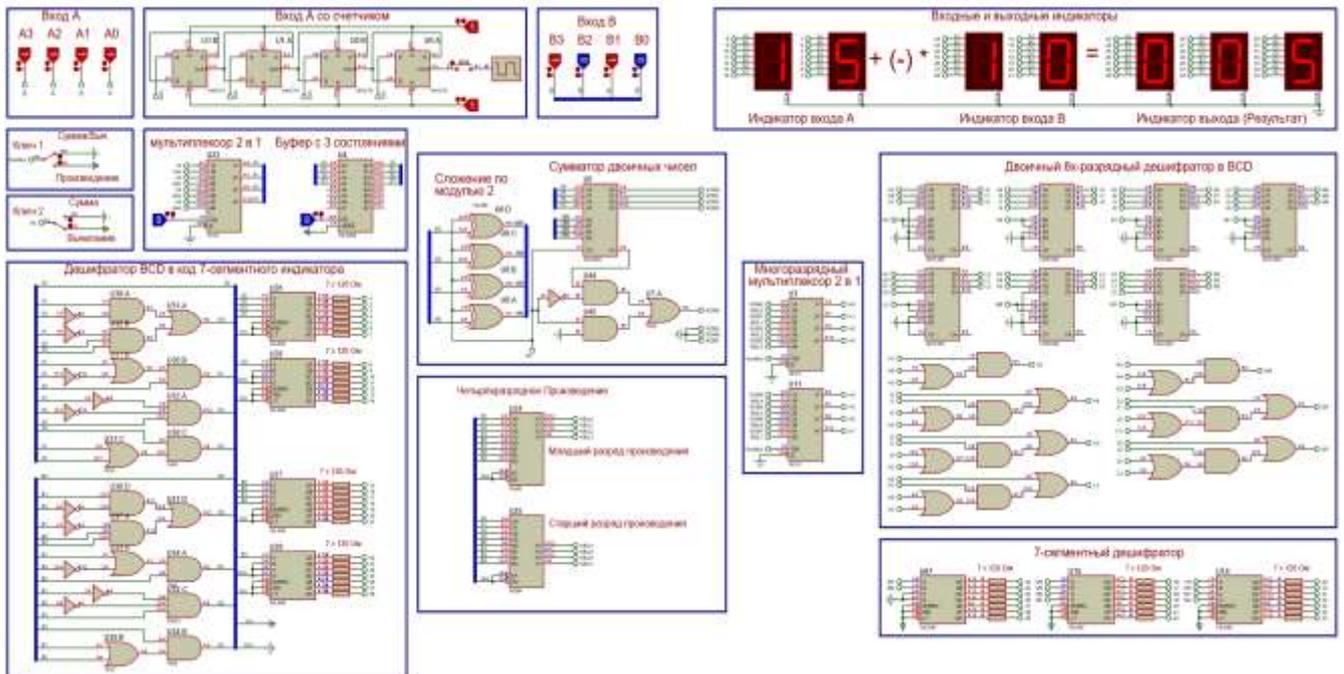


Рис. 3. Схема четырехразрядного калькулятора двоичных чисел (операция вычитания).

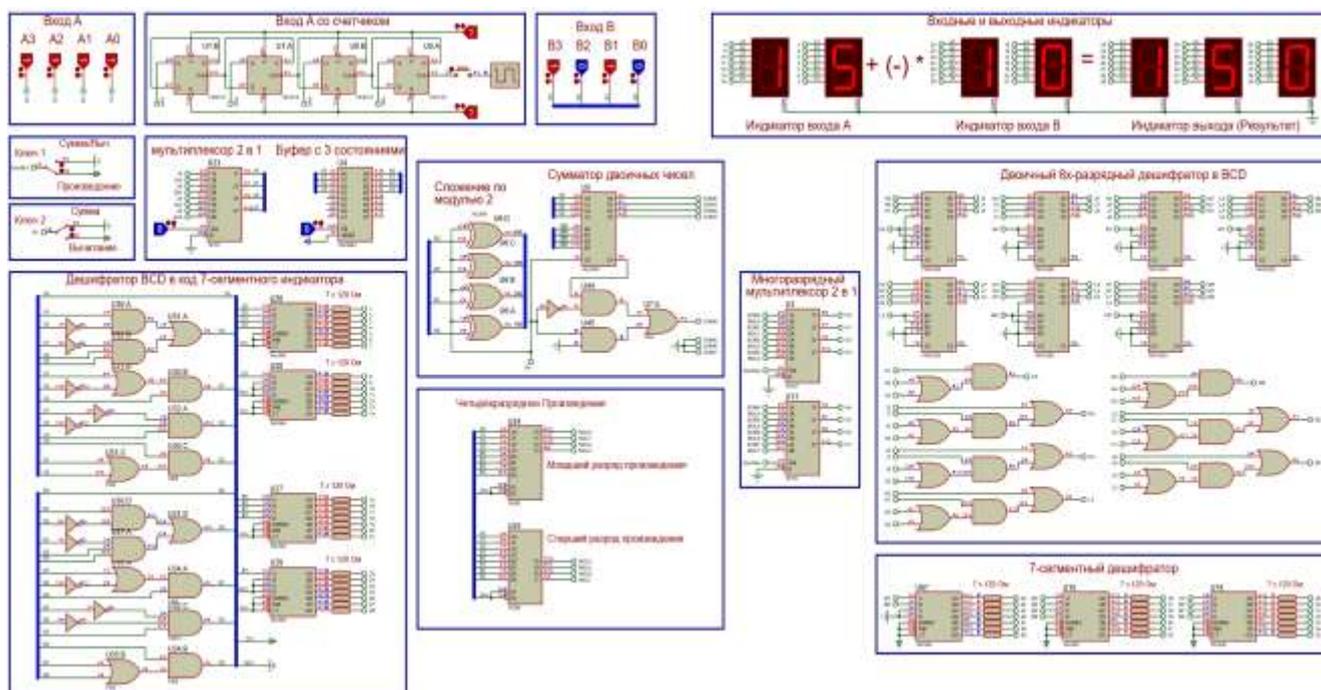


Рис. 4. Схема четырехразрядного калькулятора двоичных чисел (операция умножения).

### Список литературы

1. Новосельцева Т.Я., Пухальский Г.И. Цифровые устройства, СПб, Политехника, 1996, 885с.
2. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
3. Proteus [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.labcenter.com/>

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС DKART AIS WEB MICRO

Т. САМСОНОВА

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), ООО «Нав Девелопмент Ко»

**Аннотация.** Кратко описан программно-аппаратный комплекс, включающий веб-сервисы по предоставлению данных о гидрометеорологической и навигационной обстановке и устройство на основе микроконтроллера. Комплекс позволяет повысить информативность гидрометеорологической и вспомогательной навигационной информации за счет передачи потока данных от судового навигационного оборудования в веб-приложения в реальном времени. Описаны функциональные возможности устройства. Подтверждена работоспособность программно-аппаратного комплекса.

**Ключевые слова:** комплекс, сервер, радар, ледовый, веб, судовой, интерфейс, микроконтроллер, модуль, АИС.

### Обзор веб-сервисов предоставления навигационной информации семейства dKart.

Морской транспорт в настоящее время все больше оснащается современным оборудованием связи и навигации. Наряду с этим увеличивается и количество интернет-сервисов для представления важной информации о навигационной обстановке. На современных судах, как правило, обеспечивается подключение к Интернету, однако,

конвенционное навигационное оборудование, не имеет к нему доступа, а установка нового оборудования — сложная и дорогостоящая задача. В то же время, интернет-подключение легко осуществить, используя ноутбуки и планшеты, причем для этого не потребуется модернизировать имеющееся сертифицированное оборудование или устанавливать новое [1].

С целью улучшения информационной инфраструктуры, например для передачи на судно такой важной информации как данные о ледовой обстановке, целесообразно использовать веб-приложения, работающие с серверами береговых центров.

В современных навигационных веб-сервисах непосредственный доступ к навигационной информации о судне (координаты положения, курс, скорость и пр.) как правило отсутствует, и может быть получен из общей информации о целях АИС (суда, на которых установлены транспондеры автоматической идентификационной системы АИС).

Такая информация, как правило, предоставляется сторонними провайдерами в форме платной подписки или читается из локальной базовой станции АИС, расположенной там же, где и сам сервер. Однако, если собственное судно (судно, за которым ведется наблюдение), например, выйдет за пределы обслуживаемого системой района, то символ судна может перестать отображаться на карте. К тому же существует вероятность получения данных от провайдеров с большими задержками.

На текущий момент можно выделить три навигационных веб-сервиса dKart:

**1. dKart AIS WEB** — представляет собой самостоятельный веб-сервер, предоставляющий картографическую информацию с помощью берегового OGC-сервера (рис. 1). Также имеется возможность сбора информации от АИС-транспондеров из доступных источников и поставок ее с помощью веб-приложения заинтересованным пользователям на различных устройствах.

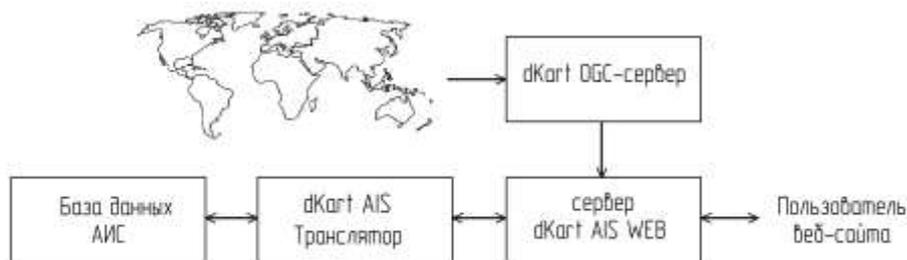


Рис. 1. Архитектура системы dKart AIS WEB.

Таким образом, на главной странице веб-сайта dKart AIS WEB цели АИС (в том числе и собственное судно) отображаются на фоне карт, предоставленных OGC-сервером и в виде таблицы целей [2, 3].

## 2. dKart AIS WEB Ice

В связи с особенностями географического положения России очень важной является задача обеспечения безопасности и эффективности навигации судов в сложных условиях ледовой обстановки. Например, северных районах на Севморпути. Судоводителям для принятия решений необходимо иметь постоянный и стабильный доступ к информации о возрасте льда, его сплоченности и дрейфе. Такую информацию в виде векторных карт и космических снимков подготавливают в береговых центрах таких организаций как ФБГУ «АНИИ», Polar View, СКАНЭКС [1].

В частности, dKart AIS WEB Ice использует ледовые данные сервера ФБГУ «АНИИ» и позволяет обеспечить отображение АИС-целей на фоне стандартных морских электронных и ледовых карт удаленным пользователям, подключенным через судовую LAN или спутниковое интернет-подключение [4]. Получение АИС-информации осуществляется таким же образом, что и в dKart AIS WEB, в связи с чем также сохраняется вероятность пропадания символа собственного судна.

### **3. СОЛОМКа**

Существенным дополнением к традиционному сервису ледовой информации (то есть к векторным ледовым картам, и спутниковым снимкам) являются снимки льда от судовых радиолокационных станций (РЛС). Одиночные ледовые снимки РЛС производятся раз в 5 минут, и, хотя у РЛС есть возможность показывать эти изображения, снимки в лучшем случае будут отображаться на карте по одному — т. е. будет ограничен обзор, и будет невозможно представить ретроспективу ледовой обстановки. Для решения этой проблемы совместно со специалистами ЗАО «Морские комплексы и системы» была разработана система СОЛОМКа [5]. Она позволяет получать и представлять информацию о ледовой обстановке в режиме реального времени в виде синтезированных радиолокационных геопривязанных ледовых снимков. Система дополнительно включает ледовые РЛС собственного судна и других судов, находящихся в области наблюдения за ледовой обстановкой, сервер сбора и обработки радарной информации (предоставляет ОГС-серверу данные в виде синтезированных снимков). Каждый такой снимок формируется с помощью радиолокационного индикатора «Ice Vision» [6].

У подобных снимков больше зона обзора, и их получение мало зависит от внешних систем. Ледовые снимки, полученные в системе СОЛОМКа, прекрасно дополняют или заменяют спутниковые изображения на трассах интенсивного судоходства. Радиолокационные ледовые снимки обеспечивают лучшее разрешение и не зависят от погодных условий. При проектировании системы была учтена необходимость эффективной передачи ледовой информации с судна в условиях ограниченной спутниковой связи в арктических регионах. Информация передается сжато, но с минимальными потерями.

Система позволяет производить запрос сразу по некоторой области и за выбранный интервал времени, что существенно упрощает восприятие. Однако, как и в описанных ранее системах постоянное отображение символа собственного судна не гарантируется.

Целью разработки программно-аппаратного комплекса является передача актуальных навигационных данных собственного судна в веб-приложения. Это может существенно повысить информативность представляемой картографической, ледовой и гидрометеорологической информации (метеорологические данные и данные о состоянии льда).

#### **Структура и принцип работы интегрированного интерфейсного модуля сопряжения.**

Наиболее эффективным решением является получение требуемых данных непосредственно от навигационного оборудования судна с последующей их обработкой и передачей потребителям (структура устройства приведена на рис. 2.). Источником таких данных может выступать АИС-транспондер, к которому подключены датчики курса и скорости, и который имеет встроенный приемник спутниковой навигационной системы, позволяющий получить координаты, путевой угол и путевую скорость [1].



Рис. 2. Структура интегрированного модуля.

Эта модель была использована при разработке интерфейсного модуля «dKart AIS WEB Micro».

Данный модуль обеспечивает фильтрацию и предварительную обработку входного потока данных NMEA (National Marine Electronics Association — общепринятое наименование интерфейса морского навигационного оборудования, входит в IEC 61162–2, [7]) за счет использования мощного микроконтроллера ESP8266 с 32-разрядным процессором и возможностью Wi-Fi подключения. Из потока различных NMEA-сообщений выделяются сообщения, несущие информацию о собственном судне. Также разработанный модуль обеспечивает контроль достоверности приема в несколько этапов: контроль приема сообщений конкретного типа, контроль целостности принятых сообщений и контроль корректности дешифрованных из сообщения данных. Поскольку сообщения о собственном судне содержат в себе инкапсулированные 6-битные двоичные сообщения AIS, проводится также проверка двоичных данных. Эти двоичные сообщения декодируются с выделением значений курса, скорости, путевого угла и координат местоположения судна [1].

Полученные в ходе обработки данные представляются в виде XML-текста, который легко читаются веб-приложениями. В веб-приложение данные посылаются ответом на HTTP-запрос, по каналу Wi-Fi. За счет эффективной обработки и оптимизированной передачи данных (раз в минуту) нагрузка на веб-приложение снижается до 300 раз.

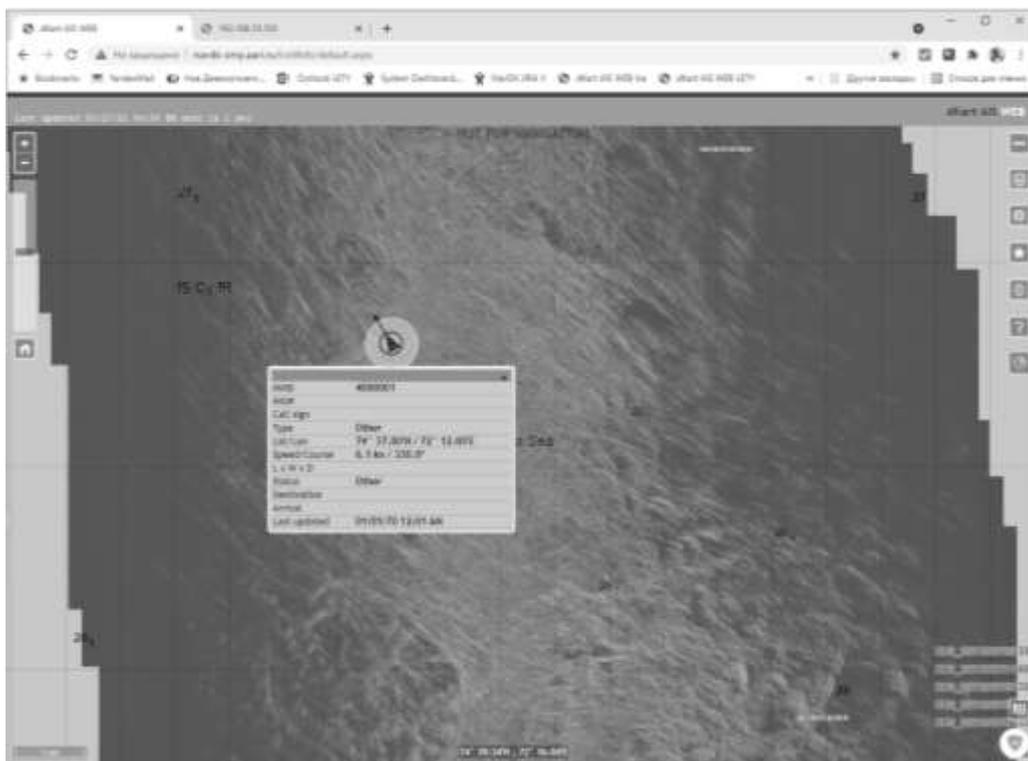


Рис. 3. Работа комплекса dKart AIS WEB Micro.

По результатам разработки выполнена проверка работы модуля совместно с имитатором АИС, роутером Wi-Fi, веб-сервером «dKart AIS WEB Ice» и системой СОЛОМКА. На рис. 3 представлен внешний вид веб-приложения при отображении радарных ледовых снимков и символа собственного судна на нем.

### Список литературы

1. Самсонова Т. Wi-Fi устройство трансляции навигационных параметров для гидрометеорологических веб-приложений // Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022.
2. НавДК // НавДК : dKart AIS Web. URL: [https://www.navdk.com/ru/ais\\_web](https://www.navdk.com/ru/ais_web) (дата обращения 01.04.2022).
3. dKart AIS Web. URL: <http://www.ais.navdk.com/ais/default.aspx>. (дата обращения 01.04.2022).
4. dKart AIS WEB Ice. URL: <http://navdk-smp.aari.ru/iceweb/default.aspx>. (дата обращения 01.04.2022).
5. НавДК // НавДК : dKart Ice Navigator // СОЛОМКА. URL: [https://www.navdk.com/ru/ice\\_solomka](https://www.navdk.com/ru/ice_solomka) (дата обращения 01.04.2022).
6. Сайт группы компаний MSC Group. URL: [https://www.mcs.ru/codeless\\_portfolio/radiolokatsionnyj-indikator-kontrolya-ledovoj-obstanovki-ice-vision/](https://www.mcs.ru/codeless_portfolio/radiolokatsionnyj-indikator-kontrolya-ledovoj-obstanovki-ice-vision/) (дата обращения 01.04.2022).
7. International Standard IEC 61162-1 Edition 4.0 2010-11 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chenyupeng.com/upload/2020/3/IEC%2061162-1-2010-728ad3778103426ab0a9a64b6cc5e474.pdf> (дата обращения: 19.01.2022).

## ОЦЕНКА ОБНАРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Р.С. СИРЫЙ, А.М. ГРИНЁВ

<sup>1</sup>*Кафедра Телевидения и Видеотехники, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В работе проведен анализ методологий оценивания эффективности способов детектирования космического мусора. Предложена методика оценивания задачи детектирования через метрику вероятности обнаружения в плоскостях размера объекта и расстояния до него. Приведен способ оптимизации аппаратно-программных конфигураций. Предложенным способом продемонстрирован анализ эффективности систем компьютерного зрения миссий «СПИРИТ», «КОРОНАС», «СОКРАТ», совмещенных с методом формирования области интереса при фиксированном значении сигнал/шум.

**Ключевые слова:** система компьютерного зрения, космический мусор, отношение сигнал/шум, детектирование объектов, вероятность обнаружения.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященных детектированию космических объектов малых размеров. Их можно разделить на несколько категорий — работы, рассматривающие только аппаратную часть системы компьютерного зрения (СКЗ) [1], а также работы, в которых приводится работа программного алгоритма, причем, данные методы используют как классические методы обработки [2], так и нейронные сети [3].

Основная проблема в том, что среди исследований не существует единой методологии оценивания эффективности решения задачи детектирования космического мусора. Более того, использование различных метрик для оценки работы ведет к тому, что провести анализ среди данных работ затруднительно.

Например, в работе [4] рассматривается космический детектор локальной орбитальной среды, направленный на обнаружение отраженного от космического мусора излучения. В данном исследовании в качестве метрики выбрано минимально зарегистрированное количество фотонов от объекта в плоскости зависимостей максимального расстояния

обнаружения, времени пролета поля зрения, и эффективной плоскости обнаружения от минимального размера объекта.

В других работах в качестве оценки результата выступают классические метрики классификатора — точность и полнота [5], а иногда их весовая комбинация — f-мера. Также присутствуют работы, в которых качество изображений оцениваются после предварительной обработки параметрами радиометрического разрешения, геометрическим разрешением и функцией MTF [6].

Кроме задачи детектирования оптического сигнала, существует также задача классификации космических объектов, которые по своей природе могут быть искусственными или естественными. Существует различные способы определения происхождения объекта, одна из них — по их траекторным признакам. На рисунке 1 изображен снимок участка неба звездными датчиками эксперимента «СПИРИТ» [7] в режиме поиска космического мусора. Визуально мусор можно отделить от звезд тем, что его трек будет не сонаправлен с треками звезд.

В рамках данной работе задача классификации зарегистрированных сигналов не стоит, поэтому ложные сигналы в виде треков звезд не рассматриваются. Оптический сигнал на изображении вызван только мусором.

Для оценки эффективности систем обнаружения необходимо использовать единый подход к расчету параметров системы. В работе [8] для сравнительного анализа предлагается использовать минимальный размер объекта в качестве характеристики оценки работы системы.

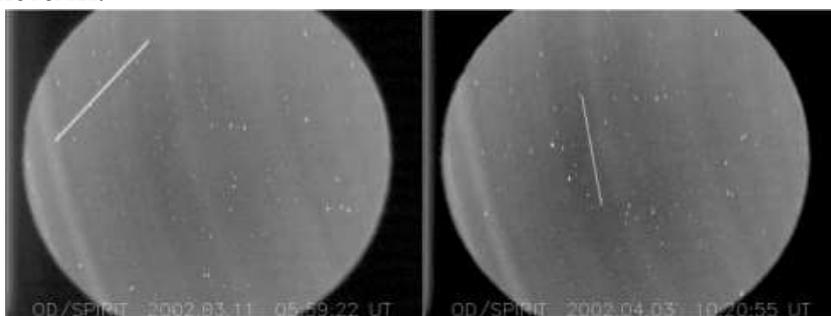


Рис.1. Изображения одного участка неба двумя звёздными датчиками эксперимента СПИРИТ в режиме поиска космического мусора.

Также в [8] приводится расчет выражения, в котором  $\Gamma_{\min}$  вычисляется исходя из параметров конфигурации СКЗ и параметров объекта. Через него можно выразить энергетику, которая попадает на плоскость сенсора:

$$Ne = \frac{r^2 \cdot a \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta_{pix} \int \lambda \cdot P_{sun}(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{4 \cdot h \cdot c \cdot R \cdot F \cdot \mathcal{G}} = T \cdot M \quad (1)$$

где SNR — отношение сигнал/шум,  $n_{rd}$  — шум считывания фотоприемника,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $R$  — дистанция до объекта,  $F$  — фокусное расстояние линзы (оптической системы?),  $v$  — относительная скорость объекта,  $a$  — коэффициент альbedo,  $D$  — диаметр линзы,  $\rho$  — коэффициент пропускания объектива,  $\beta$  — средний уровень сигнала в центральном пикселе,  $\Delta_{pix}$  — размер пиксела,  $P_{sun}(\lambda)$  — спектральная характеристика солнечного излучения,  $Q(\lambda)$  — спектральная квантовая эффективность сенсора.

Чтобы найти зависимость энергетики объекта, которое мы принимаем за то количество электронов  $N_e$ , которое было зарегистрировано сенсором от объекта, то выражение (1) можно разделить на две части — параметр  $M$ , в который входят характеристики конфигурации СКЗ, и параметр  $T$  — в котором заложены параметры среды и объекта наблюдения.

Получим:

$$T = \frac{r^2 \cdot a \int \lambda \cdot P_{sun} \cdot \pi(\lambda) d\lambda}{4 \cdot h \cdot c \cdot R \cdot \vartheta} \quad (2)$$

$$M = \frac{D^2 \cdot \rho \cdot \beta \cdot \Delta_{pix} \int \lambda \cdot Q(\lambda) d\lambda}{F} \quad (3)$$

Таким образом, если рассмотреть выражение  $T$ , то можно сделать вывод, что основными признаками космического мусора как объекта наблюдения являются его размер и расстояние до него.

Немаловажным фактом в методологии оценивания подхода к детектированию является выбор метрики. Под ней подразумевается несколько критериев — в зависимости от поставленной задачи, это может быть вероятность и точность обнаружения, точность классификации, точность определения координат объекта и т.д.

В данной работе в качестве метрики оценки обнаружения мусора предлагается использовать вероятность его обнаружения. Данный критерий можно визуализировать в плоскости размера объекта и расстояния до него.

На рис. 2 показан пример оценивания эффективности работы СКЗ, где вероятность обнаружения может быть расположена в осях минимального размера объекта от расстояния, на котором он был обнаружен, несколькими вариантами конфигурации системы. Область интереса — от 1 до 10 см при расстоянии, большим 10 км/с.



Рис.2. Зоны интереса двух конфигураций систем.

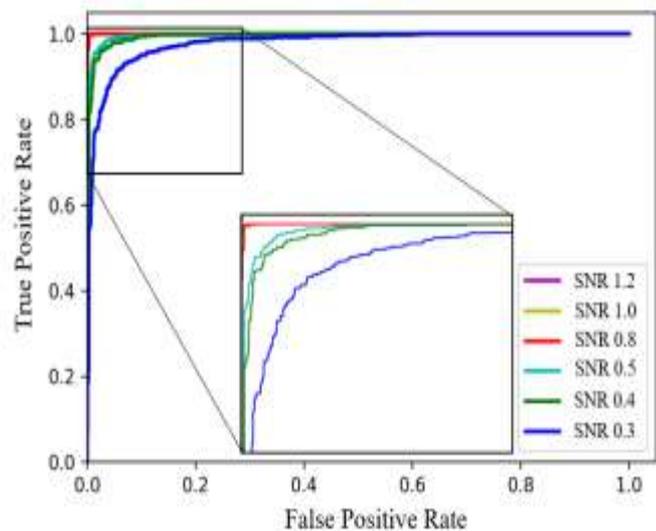


Рис.3. Кривые рабочей характеристики модели классификации с использованием различных SNR.

Разность  $\Delta_r$ , изображенная на рисунке, говорит о том, что система № 2 имеет большую эффективность, чем система № 1, так как при одном и том же отношении сигнал /шум и на одном и том же расстоянии способна обнаружить объект меньшего размера.

Исходя из выражения (1) и учитывая, что  $SNR = \frac{N_e}{n_{rd}}$ , можно получить обобщенную формулу для отношения сигнал/шум, зависящей от модели объекта и модели аппаратной части системы:

$$SNR = \frac{M \cdot T}{n_{rd}} \quad (4)$$

Можно сделать вывод о том, что, определив  $M$  как параметр, определяющий конфигурацию СКЗ, отношение сигнал/шум наблюдаемого объекта будет определяться только параметром  $N$ , который характеризует наблюдаемый объект.

Таким образом, мы можем говорить об эффективности аппаратной части нашей системы через ее отношение сигнал/шум, который можно представить в плоскости размера объекта и расстояния до него.

В космической среде оптический сигнал подвергается различным искажениям и помехам. Помимо наличия ложных полезных сигналов в виде звезд, большое количество помех вносит радиационное воздействие, которые исправляют алгоритмы предварительного обнаружения.

Наиболее распространенной метрикой таких алгоритмов являются параметры точности (precision) и полноты (recall). Кроме того, данные метрики используют в зависимости от отношения сигнал/шум при сравнении работы нескольких алгоритмов. Пример такой оценки приведен на рисунке 4, взятой из работы [3].

Можно провести зависимость отношения сигнал/шум от метрик, которыми оценивается работа алгоритмов предварительного обнаружения. Если ввести пороговое значение для показателей точности и полноты, то для таких алгоритмов можно однозначно определить SNR.

Для примера методики оценивания эффективности детектирования был взят алгоритм, представленный в работах [9, 10], называемый методом формирования области интереса.

На рисунке 5 иллюстрируется распределение отношения сигнал/шум по отношению к точности. Если предположить, что эффективным показателем точности для алгоритма является значение 0.98, то для него соответствует значение  $SNR = 79.9$ .

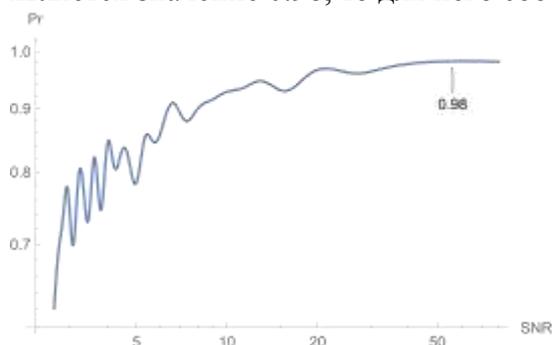


Рис. 4. График зависимости вероятности обнаружения от значения сигнал/шум.

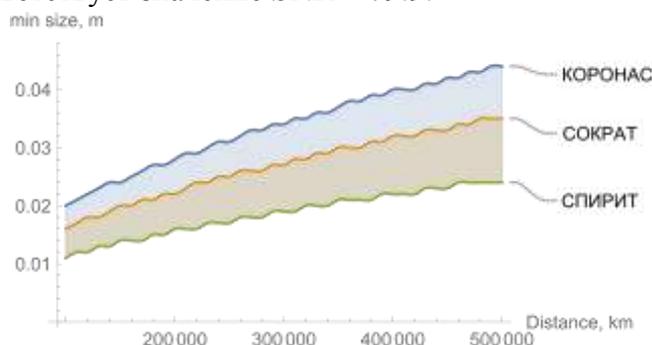


Рис. 5. Оценка эффективности конфигураций систем при  $SNR = 79.9$ .

В качестве нескольких конфигураций аппаратной части СКЗ были выбраны телевизионные системы миссий «КОРОНАС», «СПИРИТ» и «СОКРАТ». Данные систем представлены в работе [7], расчет параметров представлен в работе [8]

Значение отношения сигнал/шум была выбрана такая, для которой метод формирования области интереса выдавал точность, равную 0.98. Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

Из рисунка видно, что наилучший результат при фиксированном SNR дает конфигурация системы, которая использовалась для миссии «СПИРИТ». Стоит подчеркнуть, что различие между системами увеличивается при увеличении расстояния до объекта.

### Список литературы

1. Ch. Durin, J.C. Mandeville, J.M. Perrin. Active detection of micrometeoroids and space debris SODAD-2 experiment on SAC-D satellite. *Advances in space research*, Volume 69, Issue 10, 15 May 2022, Pages 3856-3863
2. Jia-Guu Leu. A Computer Vision Process to detect and track space debris using ground-based opticalteleshoto images. 11th IAPR International Conference on Pattern Recognition , IEEE, doi: 10.1109/ICPR.1992.201614, 1992
3. Jiangbo Xi, Yaobing Xiang, Okan K. Ersoy, Ming Cong, Xin Wei, Junkai Gu. Space Debris Detection Using Feature Learning of Candidate Regions in Optical Image Sequences. *IEEE Access*, Volume 8, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016761, 2020
4. Mike Gruntman. Passive optical detection of submillimeter and millimeter size space debris in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 105, 156–170, 2014
5. Ping Jiang<sup>1,2</sup> , Chengzhi Liu, Wenbo Yang, Zhe Kang, Cunbo Fan, Zhenwei Li. Space Debris Automation Detection and Extraction Based on a Wide-field Surveillance System. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 259:4 (13pp), 2022
6. Mattia Crespi, Laura De Vendictis. A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment. *Sensors*, 9, 3289-3313; doi:10.3390/s90503289, 2009
7. Кузин С.В., Ульянов А.С., Шестов С.В., Богачёв С.А., Карабаджак Г.Ф. Наблюдение космических объектов с помощью оптических датчиков в экспериментах СПИРИТ / КОРОНАС-Ф и ТЕСИС/«КОРОНАС-Фотон» // *Механика, управление и информатика*, том 13, №4, с. 58-69, 2013
8. Baranov Pavel S., Siryi Ruslan S., Sahnyuk Alisa S. A Wide-field Optical System for Detecting Space Debris Based on a Cubesat-Type Spacecraft. *EiConRus*, doi: 10.1109/EiConRus51938.2021.9396409, 2021
9. Осадчий И. С.. Методы обработки графической информации для повышения точности приборов астроориентации космического базирования: дис. канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 18.12.2015 — 164 с.
10. Liebe C.C. Accuracy Performance of Star Trackers—A Tutorial // *IEEE*, Vol. 38, No. 2, april 2002. pp. 587-599.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНЫХ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Х.Н. ЧАН, А.С. ПОДСТРИГАЕВ, Ч.Н. НГУЕН

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

**Аннотация.** Предложен алгоритм идентификации сигналов с линейно-возрастающим, линейно-убывающим и симметричным линейным законами изменения частоты на основе линейной аппроксимации значений мгновенной частоты. Методом имитационного моделирования в среде MATLAB получены зависимости вероятности верной идентификации этих сигналов от входного отношения сигнал-шум разработанным алгоритмом. Выполнен анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** ЛЧМ+, ЛЧМ-, СЛЧМ, оконное преобразование Фурье, линейная аппроксимация.

### **Введение**

В современных радиолокационных системах различного назначения широко используются сигналы с линейно-возрастающим (ЛЧМ+), линейно-убывающим (ЛЧМ–) и симметричным линейным (СЛЧМ) законами изменения частоты [1, 2]. Поэтому задача идентификации этих сигналов в процессе проведения радиотехнического мониторинга является, безусловно, актуальной.

Одним из наиболее распространенных подходов идентификации сигналов разных типов является использование частотно-временных признаков. При этом линейный закон изменения мгновенной частоты является важным признаком для идентификации сигналов с ЛЧМ. В работах [3, 4] описаны алгоритмы идентификации сигналов с ЛЧМ+ и ЛЧМ– на основе оконного преобразования Фурье. Однако, качество обработки алгоритмами, представленными в [3, 4], при приеме сигнала с СЛЧМ остается неисследованным.

**Цель работы** — обоснование процесса обработки сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ на основе линейной аппроксимации значений мгновенной частоты и сравнительный анализ вероятности верной идентификации этих сигналов.

### **Разработка алгоритма идентификации сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ**

Принцип работы алгоритмов, представленных в [3, 4], заключается в следующем. Принятый сигнал разбивается на последовательные сегменты и взвешиваются окнами. Затем получают амплитудные спектры  $|F(m, f_k)|$  в каждом сегменте путем вычисления быстрого преобразования Фурье. По характеру изменения полученных последовательных мгновенных спектров принимается решение о типе сигнала с ЛЧМ+ или ЛЧМ–.

Для идентификации сигналов с СЛЧМ предлагаем выполнить следующее: дополнительно после получения  $|F(m, f_k)|$  проводится сравнение их отсчетов с заданным порогом обнаружения  $z_0$ . Затем определяются значения несущей частоты в каждом сегменте. На основе полученных значений частоты строится линейная аппроксимация методом наименьших квадратов [5], при этом рассчитываются коэффициент наклона и дисперсия аппроксимированных прямых для линейно-возрастающего и линейно-убывающего участков  $a_1, \sigma_1^2$  и  $a_2, \sigma_2^2$  соответственно. Далее сравниваются полученные значения  $a_1, a_2$  и  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  с заданными порогами  $a_0$  и  $\sigma_0^2$  соответственно. По результатам сравнения принимается решение о типе принятого сигнала.

Алгоритм описывает выше процесс идентификации сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ показан на рис. 1.

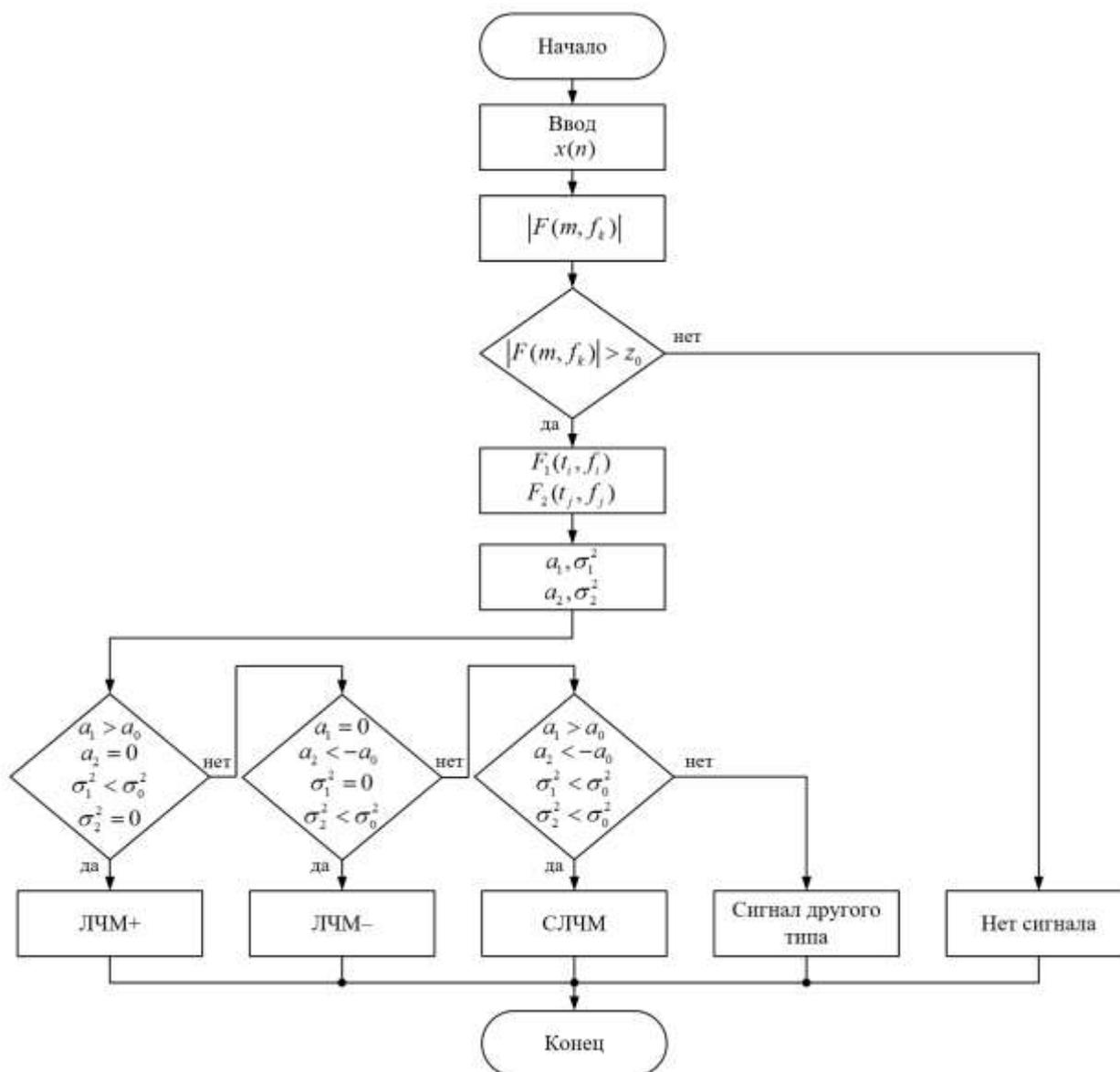


Рис. 1. Алгоритм идентификации сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ.

### Имитационное моделирование

Для оценки чувствительности алгоритма, представленного на рис. 1, проведено его имитационное моделирование в среде MATLAB.

Исходные данные алгоритма и сигналов представлены в табл. 1.

При имитационном моделировании вероятность верной идентификации сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ оценивалась отношением числа реализаций с идентификацией сигнала к общему числу реализаций.

На рис. 2 представлены полученные результаты моделирования по 1000 измерений.

Исходные данные алгоритма и сигналов

№	Параметры	Значение
1	Частота дискретизации (ГГц)	3,2
2	Вид окна взвешивания	Окно Хэмминга
3	Длина окна (отсчетов)	4096
4	Количество окон	40
5	Вероятность ложной тревоги	$10^{-8}$
6	Амплитуда сигналов (дБ)	-20...-5
7	Начальная фаза сигналов (рад)	$0 \dots 2\pi$
8	Ширина спектра сигналов (МГц)	20...1200
9	Скорость изменения частоты сигналов (МГц/мкс)	1...30
10	Длительность сигналов (мкс)	20...40
11	Среднее значение шума	0
12	Дисперсия шума	1

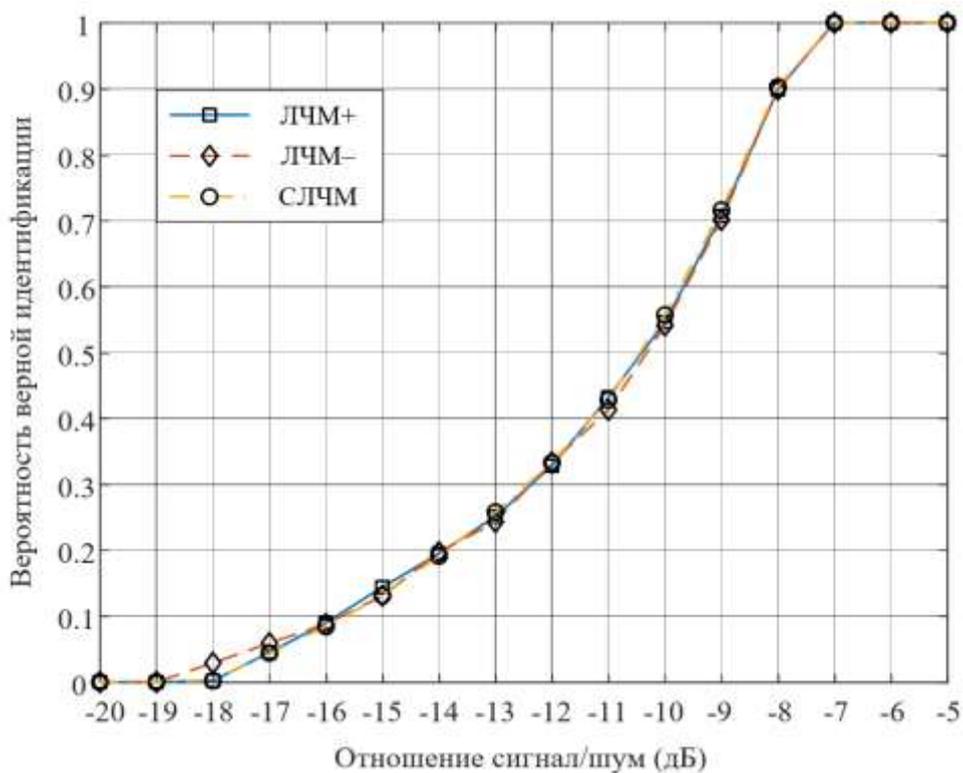


Рис. 2. Зависимости вероятности верной идентификации сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ- и СЛЧМ от входного отношения сигнал-шум.

## **Выводы**

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1. Предложенный алгоритм позволяет распознавать сигналы с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ с вероятностью верной идентификации не менее 0,9 при отношении сигнал-шум выше — 8 дБ.

2. Графики для сигналов с ЛЧМ+, ЛЧМ– и СЛЧМ незначительно отличаются друг от друга. Это связано с тем, что параметры обрабатываемых сигналов этих типов выбраны в одинаковых диапазонах.

3. Появление наклонов графиков для всех рассмотренных типов сигналов связано с широким обрабатываемым диапазоном их скорости изменения частоты (от 1 МГц/мкс до 30 МГц/мкс).

Последующие исследования авторов будут направлены на дальнейшее развитие анализа сигнальной обстановки на основе линейной аппроксимации значений мгновенной частоты, в частности выявление аналогичных зависимостей при приеме других типов сигналов.

## **Список литературы**

1. Доматырко Д. Г. Моделирование ЛЧМ сигналов и их достоинства перед другими сложными сигналами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 4. С. 144-149.
2. Rohling H., Moller C. Radar waveform for automotive radar systems and applications // 2008 IEEE Radar Conference. 2008. С. 1-4.
3. Тутьгин В. С., Шедов С. В., Южаков А. В. Новые адаптивные алгоритмы обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1. С. 16-23.
4. Волков В. Г. и др. Быстрый алгоритм параметрического частотно-временного оценивания одномодовых комплексных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 1. С. 16-16.
5. Зоркальцев В. И., Анциферов Е. Г., Булатов В. П. Метод наименьших квадратов. Новосибирск: Наука, 1995. — 219 с.

---

Сборник материалов  
X Научно-практической конференции с международным участием  
«НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО»  
для студентов, аспирантов и молодых ученых  
состоявшейся 19-21 мая 2022 г.  
в г.Санкт-Петербурге  
Том I