

МЕТОДЫ НАНОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

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

Мошников В.А.

профессор, факультет электроники

«Наука настоящего и будущего, ННБ-XI» СПб, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 18-19(20) мая 2023г.





Данный пленарный доклад посвящен рассмотрению специальных методов на основе эффекта внутреннего трения (ВТ) для анализа процессов нанотехнологии, однородности наноматериалов, процессов деградации и др. Основное внимание уделено методикам на базе измерения температурных зависимостей ВТ по обращенного маятника



Ключевые слова— Принципы активной метрики, миграция жидких зон в градиенте температуры, анализ самолегирования, диагностика жертвенного легирования и состава наночастиц при укрупнении пор, методики анализа процессов гидролиза, поликонденсации и синерезиса в золь-гель-технологии

ПЛАН

- Физические основы метода внутреннего трения.
- Измерение температурной зависимости внутреннего трения по методике обращенного маятника.
- Научная школа, основанная проф. Ормонтом Б.Ф.
- Особенности диаграмм состояния систем М-Х, содержащих бинарное соединение МХ
- Квазихимическое приближение
- Принципы активной метрики
- Классические и нетрадиционные механизмы роста наноматериалов
- О термомиграции жидких зон в градиенте температуры
- Анализ состава внутри области гомогенности. Соответствующего условию конгруентного плавления
- Способ контроля особенностей возникновения неоднородностей состава полупроводниковых твердых растворов на фронте кристаллизации
- -Способ оценки параметров термомиграции жидких зон в твердом теле в градиенте температуры.
- - Способ диагностики процессов, протекающих в образцах, получаемых галогенным методом. Эффект самолегирования.
- Способ анализа укрупнения пор при жертвенном легировании
- Методики на основе ВТ для тестирования электретных структур.
- Анализ нановключений в сетчатых газочувствительных слоях.
- Методики анализа процессов гидролиза, поликонденсации и синерезиса в золь-гельтехнологии.
- Перспективы развития методов нанодиагностики на основе ВТ, в том числе для развития технологии перовскитных систем солнечной энергетики

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ



В качестве методов измерения внутреннего трения используют информацию о затухании свободных колебаний (продольных, поперечных, крутильных, изгибных). Также известны методы, основанные на изучении резонансной кривой для вынужденных колебаний и относительного рассеяния за один период колебаний

Поясним физическую сущность наблюдаемого опытным путем затухания свободных изгибных колебаний пластины на примере рассмотрения термоупругого эффекта. При изгибе равномерно нагретой тонкой пластинки из материала, расширяющегося при нагреве, растянутые участки образца охладятся, а сжатые – нагреются. Таким образом, деформирование вызовет нарушение теплового равновесия. Выравнивание температуры сопровождается необратимым переходом упругой энергии в тепловую и является одной из причин затухания колебаний. Такой процесс восстановления нарушенного равновесия называют релаксацией. Если в твердом теле одновременно протекает несколько релаксационных процессов с различным временем релаксации т_i, то совокупность всех времен релаксации образует так называемый релаксационный спектр. При этом, изменяя частоту вынужденных колебаний можно выделить последовательность резонансных пиков ВТ. Для целей анализа пленочных наноматериалов и технологических процессов наиболее эффективны конструкции тина обращенного маятника. В таких схемах измерения деформационным воздействиям пластинчатых образцов подвергаются только поверхностные слои и тем самым реализуется возможность интегрально получать

Постников В.С. Внутреннее трение в металлах.-М.: Металлургия, 1974

Александров Л.Н., Зотов М.И. Внутреннее трение и дефекты в полупроводниках.

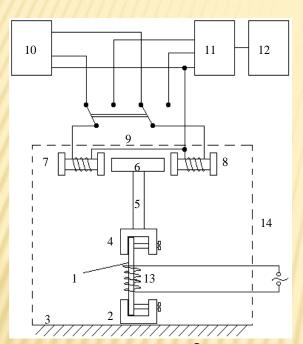
Новосибирск: Наука, 1979

информацию о свойствах всего слоя покрытия.

Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. – М.: Атомиздат, 1975

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ. СХЕМА ОБРАШЕННОГО МАЯТНИКА





Испытуемый образец закрепляется одним концом с помощью цанги 2 к основанию 3. К другому концу образца 1 прикрепляют цангу 4 с маятником 5, в верхней части которого установлено кольцо 6 из ферромагнитного материала. Вблизи кольца 6 симметрично располагают катушки 7 и 8, которые с помощью переключателя 9 подключают либо к генератору низкой частоты 10, либо к амплитудному дискриминатору 11, выходом соединенному с электронным счетчиком 12. В первом случае катушки 7 и 8 используют в качестве возбудителя механических колебаний маятника 5 за счет взаимодействия магнитного поля катушек с ферромагнитным кольцом 6, во втором случае – в качестве датчика перемещений кольца 6. Вблизи образца 1 располагают нагреватель 13. Элементы 1, 2, 4-8, 13 помещены в герметичный контейнер 14, из которого откачивают воздух для снижения демпфирования колебаний маятника 5.

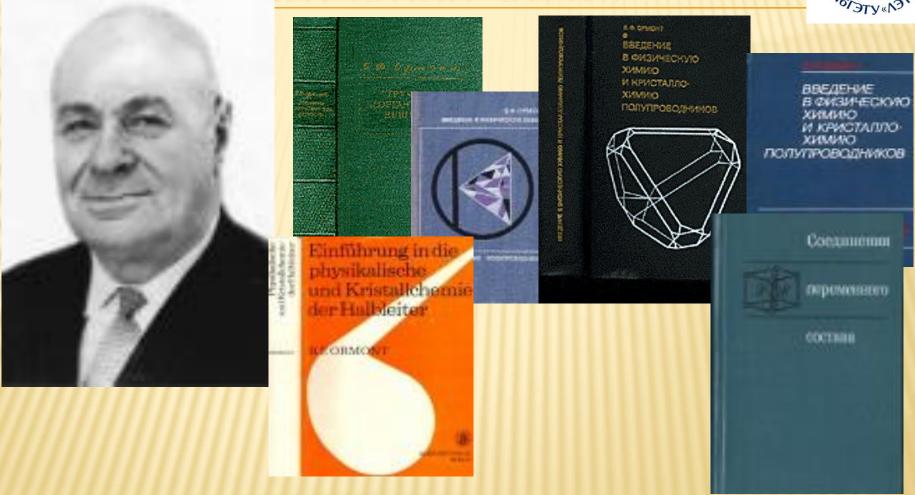
Схема установки для измерения температурной зависимости ВТ

Митрохин В.И., Рембеза С.И., Ярославцев Н.П. и др. Способ определения инородных включений в твердых телах - Авторское Свидетельство СССР No 1179183, 1985

Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гель-технологии нанокомпозитов- СПб.: ООО Техномедиа Изд-во Элмор, 2008. (2-е издание)-255c

Б. Ф. ОРМОНТ (1900 -1978)





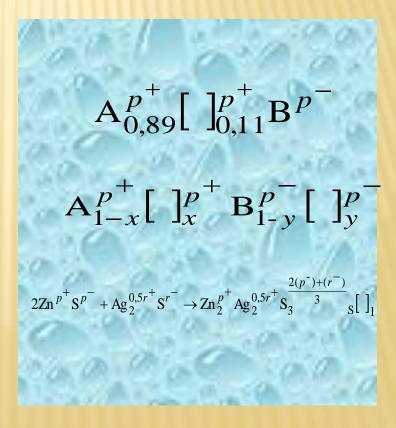
Термодинамические и кинетические условия получения и обработки материалов предопределяют их состав внутри области гомогенности и , соответственно, свойства

МАТЕРИАЛ ИЗ ВИКИПЕДИИ



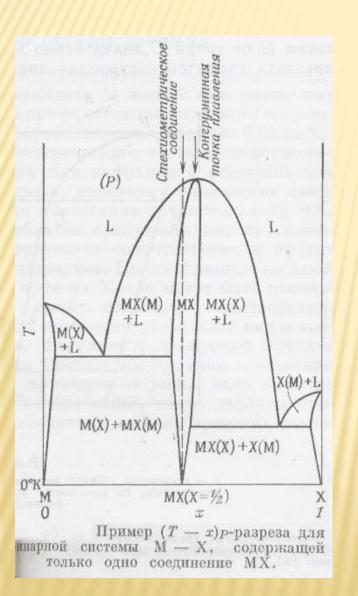
Борис Филиппович Ормонт (<u>29 января 1900</u> — <u>27 марта 1978</u>, <u>Ленинград</u>) — известный специалист в области кристаллохимии и физикохимии твёрдых веществ, доктор химических наук (<u>1939</u>), профессор (<u>1940</u>), создатель термодинамической шкалы твёрдости



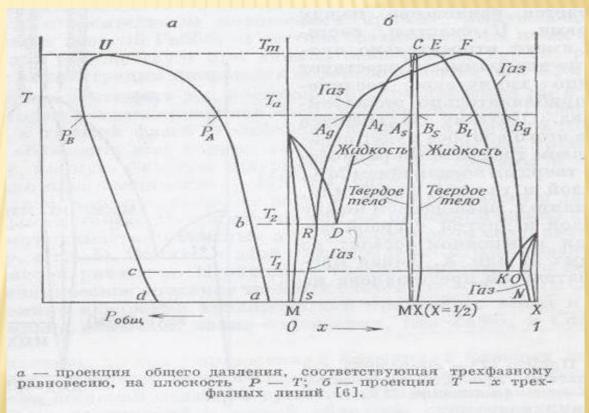


Особенности диаграмм состояния систем М-Х, содержащих бинарное соединение МХ

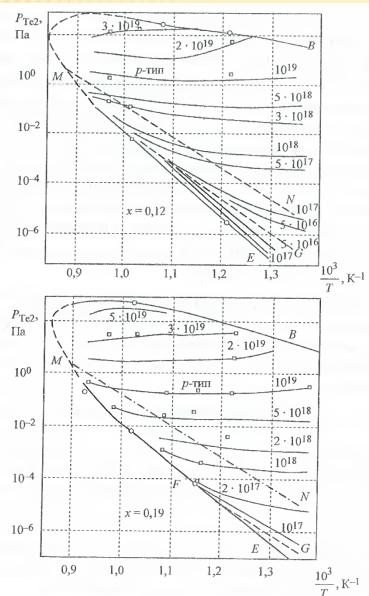




Особые точки диаграммы состояния – конгруэнтное плавление, конгруэнтная сублимация, конгруэнтное испарение



Квазихимическое приближение фаз с отклонением от стехиометрии



гис. 4.11. Диаграмма P_{Te2} -T- p_{77} , n_{77} системы Pb-Sn-Tc: MN – линия, соответствующая P_{Te2} min; FG – P_{Te2} для состава y твердой фазы, соответствующего термодинамическому p-n-переходу

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{P,T,n_i} dn_i,$$

где G — энергия Гиббса, S — энтропия, P — давление, V — объем фазы, n_i — число молей i-го компонента.

$G = H - T \cdot S$

Рассмотрим равновесие между концентрацией собственных дефектов и составом пара над кристаллом. Увеличение значения давления пара теллура приводит к возрастанию концентрации вакансий в подрешетке металлов. Реакцию образования заряженных вакансий в металлической подрешстке можно записать так:

$$\frac{1}{2} \text{Te}_{2\text{ras}} = (1 - x) \left[V_{\text{Pb}}^{2-} \right] + x \left[V_{\text{Sn}}^{2-} \right] + 2h + \text{Te}_{\text{Te}}. \tag{4.19}$$

Константа равновесия реакции (4.19) запишется в виде

$$K_{\text{Te}_2,V} = \frac{\left[V_{\text{Pb}}^{2-}\right]^{1-x} \left[V_{\text{Sn}}^{2-}\right]^x p^2}{P_{\text{Te}2}^{1/2}}.$$

Увеличение давления пара металлических компонентов приводит к заполнению вакансий в металлической подрешетке и к росту концентрации атомов металлов в междоузлиях. Равновесие между газовой фазой и собственными дефектами, представляющими собой атомы металлов в междоузлии, можно представить в виде

$$(1-x)\operatorname{Pb}_{ra3} + x\operatorname{Sn}_{ra3} \leftrightarrow (1-x)\left[\operatorname{Pb}_{i}^{2+}\right] + x\left[\operatorname{Sn}_{i}^{2+}\right] + 2e^{-}.$$

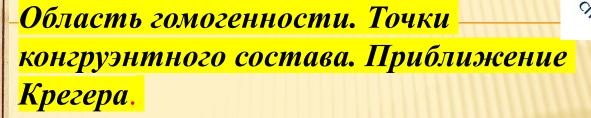
Соответствующая этому процессу константа равновесия может быть записана следующим образом:

$$K_{\text{M},i} = \frac{\left[\text{Pb}_i^{2+}\right]^{1-x} \left[\text{Sn}_i^{2+}\right]^x n^2}{P_{\text{Pb}}^{1-x} P_{\text{Sn}}^x}.$$

Исходя из того, что свинец и олово распределяются статически равномерно в подрешетке металлов, константы равновесия можно записать в следующем виде:

$$K_{\text{Te}_2, V} = \frac{\left[V_{\text{M}}^{2-}\right]p^2}{P_{\text{Te}_2}^{1/2}}; \quad K_{\text{M},i} = \frac{\left[M_i^{2+}\right]n^2}{P_{\text{Pb}}^{1-x}P_{\text{Sn}}^{x}},$$
 (4.20)

Ф.Крёгер **ХИМИЯ НЕСОВЕРШЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ**



TIEPBE ISSUENTIAL TOTAL TOTAL



HAPPENSE CORPT DO 4455600 XHMMEROW OCHORAN

CHICAGO DESCRIPTION CONTRACTOR OF CONTRACTOR

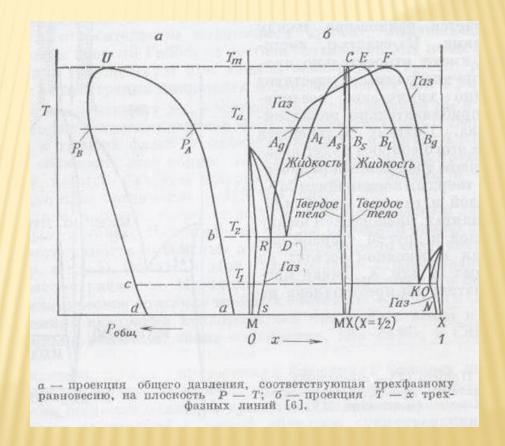
ORIGINAL SE SECOPTAMORETCHOSE EXPRISES MIN. SEC. KYTHAKOBA

В.П.ЗЛОМАНОВ, А.В.НОВОСЕЛОВА

Р-Т-х-диаграммы состояния систем металл- хальноген

SHARING SECRETARIAN SHARING SECTION SHARING SECRETARIAN SHARING SECTION SECTION SHARING SECTION SHARING SECTION SHARING SECTION SECTIO





ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОДИАГНОСТИКИ



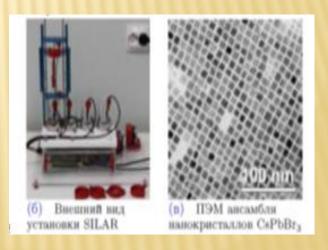
В наномире кроме термодинамических и кинетических условий получения и обработки материалов на свойства наноматериалов также влияют размеры нанообъектов, их форма, лиганды, атомно-молекулярный дизайн и иерархия наноструктур.

Принципы Активной метрики

 Фактор, определяющий уровень информационного шума по анализируемому параметру в следах одной и той же системы, а также в системах, связанных свойством "система-подсистема" может отличаться не только значением уровня, но и физической природой.

При этом под термином "след" понимается отклик системы на энергетическое воздействие, приводящее к необратимым изменениям. Например, к перераспределению компонентов в процессе кристаллизации.

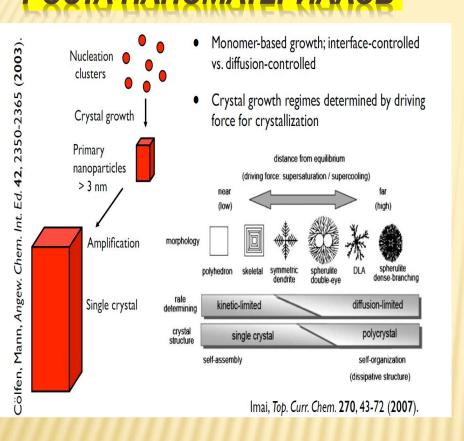
 Если уровень информационного шума по анализируемому параметру в следах разного типа одной и той же системы обусловлен факторами, разными по физической природе, то существует более общая система, в которой уровень информационного шума может быть снижен.

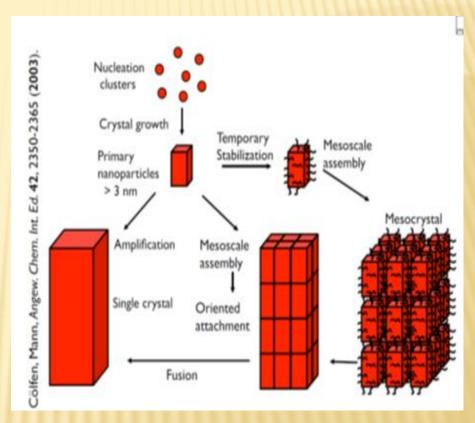


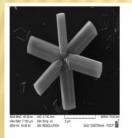
Мошников В.А. ЛОКАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ И ПОЛУЧЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ <u>PACTBOPOB</u> // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 1996

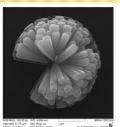
КЛАССИЧЕСКИЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ РОСТА НАНОМАТЕРИАЛОВ

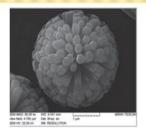


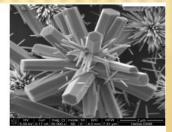




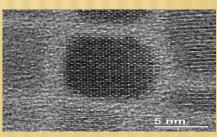




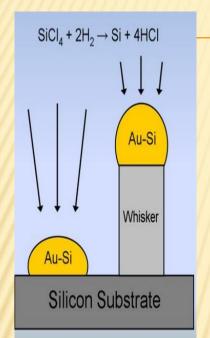








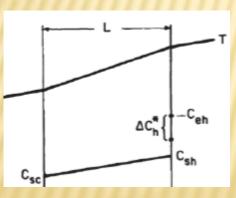
О ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ЗОН В ГРАДИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ





Микрофотография участка поверхности образца ${\rm Pb}_{0.8}{\rm Sn}_{0.2}{\rm Te}$ вблизи сгорячего» торца.

T. T. Dedegkaev, D. K. Lagkuev, V. A. Moshnikov, D. A. Yaskov, HOMOGENEITY CHANGE OFLEAD TELLURIDE-TIN TELLURIDE SOLID-SOLUTIONSDURING ANNEALING UNDER TEMPERATURE-GRADIENT CONDITIONS, Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 1983, Volume 53, Issue 2, 404–406



В результате градиентных испытаний установлено обогащение областей, прилегающих к «горячему» торцу, микронеоднородностями теллурового х а р а к т е р а . Типичные включения имели Н а рис. 1 приведена микрофото

г р а ф и я участка поверхности одного из образцов Р b 0 # 8 S n 0 > 2 T е после отжига в течение 1706 ч п р и перепаде температуры между торцами 435 К . Температура холодного торца составляла 350 К .

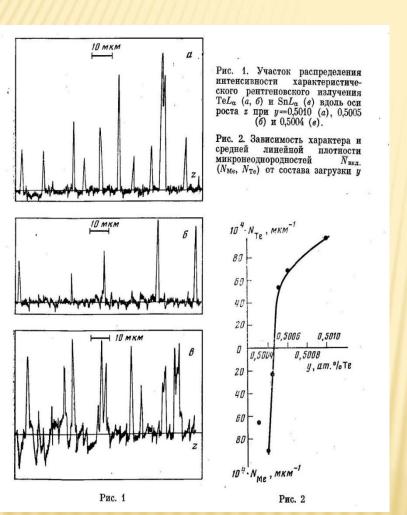


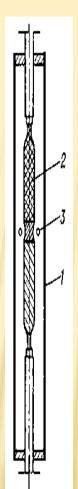
- 1. Растворение кристалла на более нагретой межфазной границе.
- 2. Диффузия атомов растворенного вещества в объеме жидкой фазы.
- 3. Их кристаллизация на более холодной стороне включения.
- 4. Испарение компонентов вешества жидкой фазы.
- 5. Проявление порогового эффекта межфазных процессов.
- 6. Присутствие в жидкой фазе инородных микровключений.
- Проявление движущей силы, связанной с различием концентрации примесных атомов н/или структурных дефектов в растворяющемся и кристаллизующемся слоях.
- 8. Термодиффузия (эффект Соре).
- 9. Тепловые эффекты на межфазных границах движущегося жидкой зоны.
- 10. Диффузия вакансий и атомов ростового вещества по границам зоны.
- 11. Неравенство теплопроводностей, сопрягающихся жидкой и твёрдой фаз.
- 12. Нестабильности формы зоны.
- 13. Нестабильности траектории движения зоны.
- 14. Анизотропия кристалла.
- 15. Особенности процесса погружения зоны в кристалл.
- 16. Особенности процесса выхода жидкой фазы из кристалла.

Гегузин Я.Е., Кривоглаз М.А. Движение макроскопических включений в твердых телах- М.: Металлургия, 1971-344 с. Середин Б. М. Физико-технические основы технологии силовых кремниевых приборов с использованием метода термомиграции жидких зон Диссертация на соиск. уч. ст. д.т.н. Новочеркасск, 2017

АНАЛИЗ СОСТАВА ВНУТРИ ОБЛАСТИ ГОМОГЕННОСТИ. СООТВЕТСТВУЮЩЕГО УСЛОВИЮ КОНГРУЕНТНОГО ПЛАВЛЕНИЯ







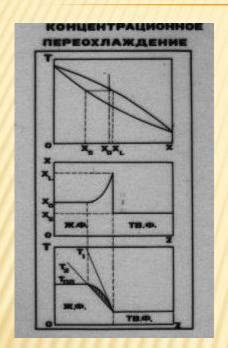
Разработка специальных методик по концентрированию микровключений позволили определить составы, соответствующие условию конгруентного плавления У мах экспериментальными электроннозондовыми методами. Например, в Pb_{1-v}Te_v $Y_{s max} = 0,500135$ ат.дол. Те . При этом аналитическая **ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ** рентгеноспектрального микроанализа по микровыделениям в **10**³-**10**⁴ раз лучше, чем в случае непосредственного анализа состава окружающей матрицы.

Т. Т. Дедегкаев, Н. Е. Мокроусов, В. А. Мошников, Д. А. Яськов // ЖФХ. 1982.

T. 56. C. 2883

СПОСОБ КОНТРОЛЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОСТАВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ФРОНТЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ





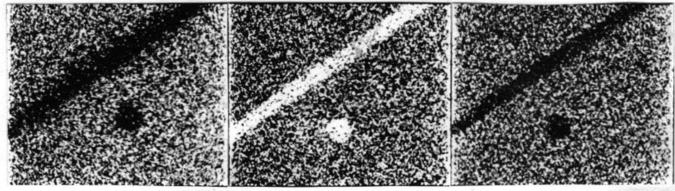


Рис. 7.25. Результаты анализа поверхности IOOxIOO мкм $^{\mathbb{Z}}$ в слитке $\mathrm{Cd}_{\mathbf{X}}\mathrm{Hg}_{1-\mathbf{X}}\mathrm{Te}$ вблизи участка смены метода кристаллизации. Микрофотографии в лучах: CdL_{α} (а), TeL_{α} (б), HgL_{α} (в).

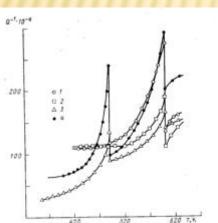
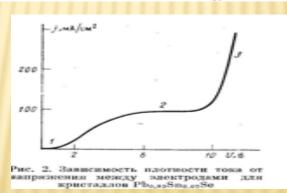
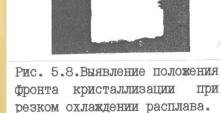


Рис. 1. Температурные зависимости внутренного трения в образцах селенида синица для различных составов (y) исходной загрузки $\mathrm{Pb}_{1-y}\mathrm{Se}_y$ $(y=0.49995\ (I),\ 0.50000\ (2),\ 0.50015\ at.\ дож Se <math>(4))$



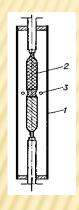
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДОВ И ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА И ОЛОВА Мошников В.А., Томаев В.В. Электрохимия. 1991. Т. 27. № 6. С. 769-772.

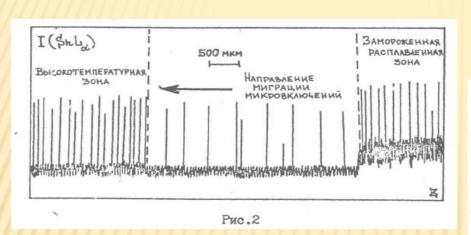


MEN COLLEGE

СПОСОБ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ЗОН В ТВЕРДОМ ГЕЛЕ В ГРАДИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ







По теории: для цилиндрических включений:

$$G = \frac{2\lambda_{78}}{\lambda_{78} + \lambda_{36}} G^*$$
, (2) соответственно для сферических включений
$$G = \frac{3\lambda_{78}}{2\lambda_{78} + \lambda_{36}} G^*$$
, (3) где G^* – внешний градиент температуры; λ_{78} – коэффициент теплопроводности расплавленного микровключения.

Проблема :Анализ особенностей термомиграции . Разработан способ, заклющающийся в перемещении расплавленной зоны 2 с высоким градиентом температуры G=200K/см) в конец слитка и замораживания реперного участка. Затем зона частично смещается (для сохранения информации), вновь нагревается и перемещается с заданными кинетическими параметрами. При высоких скоростях перемещения или малых значениях градиента температуры происхадит «потеря» микро- и нановключений, во вторичной замороженной зоне содержится информация об эффективности перемещения. Такой случай для PbSnTe (x=0.2 моль доли SnTe) качественно показан на рис 2. (При T=700 К и скорости перемещения включений Sn 5

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЕМ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ ВТОРОЙ ФАЗЫ В КРИСТАЛЛАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА-ОЛОВА Дедегкаев Т.Т., Мокроусов Н.Е., Мошников В.А.//Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 1984. № 338. С. 64

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ОДНОРОДНОСТИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА-ТЕЛЛУРИДА ОЛОВА ПРИ ОТЖИГЕ В УСЛОВИЯХ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ Дедегкаев Т.Т., Лагкуев Д.Х., Мошников В.А.//Журнал технической физики. 1983. Т. 53. № 2. С. 404.

СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ОБРАЗЦАХ, ПОЛУЧАЕМЫХ ГАЛОГЕННЫМ МЕТОЛОМ. ЭФФЕКТ САМОЛЕГИРОВАНИЯ



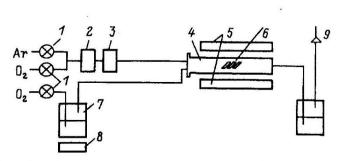
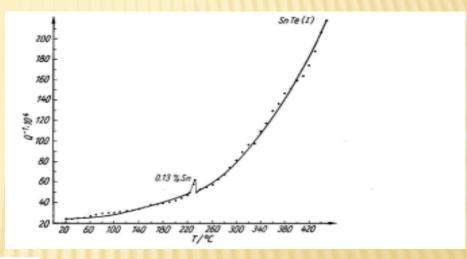


Рис. 1. Схема установки для окисления. I — кран точной регулировки, 2,3 — барбатеры, 4 — кварцевая труба, 5 — печь, 6 — подложки, 7 — барбатер с деионизованной водой, 8 — печь, 9 — выходной нейтрализирующий барбатер.



Таким образом, на стадии отгонки йодида происходит самолегированис теллурида олова избыточным оловом:

$$2SnI_2 \rightarrow SnI_4 + Sn.$$

С удалением SnI₄ остается смесь SnTe<I> и Sn. Такие материалы будут содержать избыток олова (даже при отработке режимов, обеспечивающих преимущественную отгонку SnI₂). Большой избыток Sn обеспечивает (после этапа сплавления) получение теллурида олова с составом, отвечающим границе области гомогенности со стороны металла. Для односторонней фазы $Sn_{1-y}Te_y$ (всегда имеющей p-тип проводимости) это отвечает наименьшей концентрации дырок и объясняет ранее непонятные результаты работы [5].

ХАЛЬКОГЕНИДЫ И ОКСИДЫ ЭЛЕМЕНТОВ IV ГРУППЫ. ПОЛУЧЕНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ / ред. Мошников В.А. Авторы: Александрова О.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Чеснокова Д.Б. Санкт-Петербург, 2008.

СПОСОБ АНАЛИЗА УКРУПНЕНИЯ ПОР ПРИ ЖЕРТВЕННОМ ЛЕГИРОВАНИИ



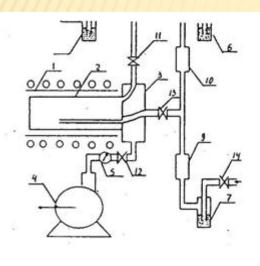


Рис. 1. Схема установки окисления слоев в контролируемых условиях. 1 - резистивная печь; 2 - кварцевый контейнер; 3 - держатель контейнера; 4 - вакуумный насос; 5 - вакуумметр; 6,7,8 - барбатеры; 9, 10 - силикагелевые фильтры; 11; 12; 13 - вакуумные краны; 14, 15 - краны точной регулировки.

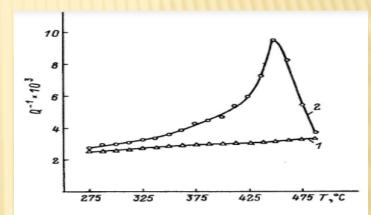


Рис. 3.Температурная зависимость ВТ для поликристаллических слоев олова, легированных SnTe</>(26,6 at %); где (1) - до отжига; (2) - после отжига в течение 30 ч. при T=760 К.

5-я Международная конференция "П и П '98" - 444 - 5th International conference "F and C '98"

Измерению ВТ подвергались образцы, полученные в едином технологическом цикле на этапе нанесения слоя олова и низкотемпературного окисления.

Было установлено, что в образцах, легированных теллуром, в отличие от образцов, полученных из чистого олова, в процессе высокотемпературного окисления появляется пик ВТ при температурах, близких к температуре плавления теллура. При этом интенсивность пика при увеличении времени отжига от 6 до 30 часов возрастает в двенадцать раз.

интерпретированы результаты MOTYT быть изменение распределения теллура в поликристаллическом покрытии. Отсутствие пика ВТ (рис 3) при обработки свидетельствует о наличии прочных химических связей, характерных для теллура в структуре SnTe (температура плавления 805°C). При увеличении времени отжига, теллур диффундирует к поверхности зерен и выделяется в виде преципитатов второй фазы. На рис.3 также приведена температурная зависимость ВТ для образца, подвергнутого отжигу в течение 30 часов. Как видно из рис.3, в течение отжига происходит накопление выделившейся фазы. При увеличение времени отжига, особенно в условиях динамического вакуума, процесс накопления имеет явно выраженный экстремум. Это связано с тем, что теллур обладает достаточно высоким значением паршиального давления пара и постепенно удаляется в процессе откачки. Наиболее интересные результаты

МЕТОДИКИ НА ОСНОВЕ ВТ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРЕТНЫХ СТРУКТУР



Из диссертации Козодаева Д.А.:

Общим для всех исследованных незаряженных образцов являлось обнаружение релаксационных максимумов на температурной зависимости ВТ при температуре $\sim 180^{\circ}$ C для Si-SiO₂ и $\sim 100^{\circ}$ C и $\sim 180^{\circ}$ C для Si-SiO₂-Si₅N₄ (рис.1).

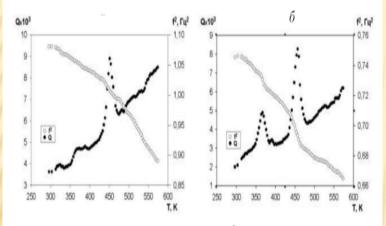


Рис. 1. Спектры BT (Q) и модуля упругости (f^2) незаряженных образцов Si-SiO₂ (a) и Si-SiO₂-Si₃N₄ (δ).

Для электризованных образцов рассматриваемая методика является достаточно информативной для определения энергетического положения пика ВТ, связанного с релаксационными процессами. Наиболее интересным физическим результатом является возможность отслеживания изменения температуры максимума пика, сопровождающееся стеканием заряда. На рисунке 2 представлены спектры ВТ для заряженных образцов. С каждым последующим измерением заряд уменьшается, это сопровождается движением релаксационного пика в область более высоких температур и, что особенно интересно, перегибом и увеличением модуля упругости в области пика.

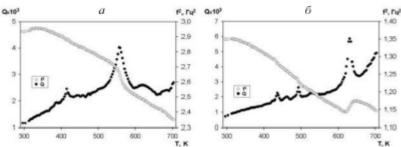


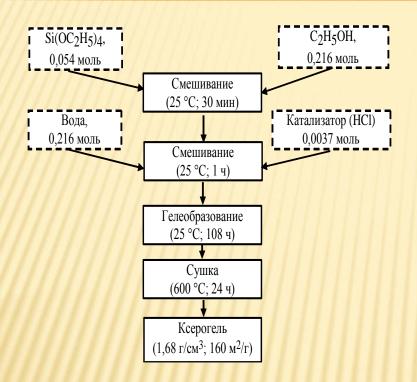
Рис. 2. Спектры ВТ и модуля упругости электризованных образцов Si-SiO₂ (a) и Si-SiO₂-Si₃N₄ (δ).

Ильин А.С., Козодаев Д.А., Митрохин В.И. и др. Внутреннее трение в электризованных структурах Si_3N_4 //В сб.: Твердотельная электроника и микроэлектроника. Межвузовский сборник научных трудов. Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2003. С. 16-20

Андреев Ю.Н., <u>Даринский</u> Б.М., Козодаев Д.А. и др. Контроль дефектов в пластинах кремния, покрытых слоем окисла методом низкочастотного внутреннего трения// В сб.: Температуроустойчивые функциональные покрытия. -Тула, 2001, ч.1, с.207-209



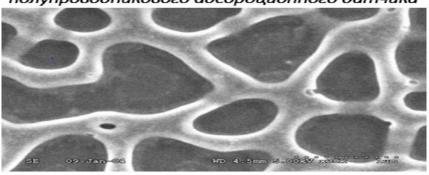
СЕТЧАТЫЕ СЛОИ ПО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ



!!!ПРОБЛЕМА: Анализ нановключений в нановетвях

Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гельтехнологии нанокомпозитов- СПб.: ООО Техномедиа Изд-во Элмор, 2008. (2-е издание)-255с

Пример структуры <u>газочувствительного</u> слоя полупроводникового адсорбционного датчика



Прекурсоры на основе алкооксидов. Пример -ТЭОС. Реакции гидролиза и поликонденсации.

$$\equiv$$
 Si − OR + HOH \Rightarrow \equiv Si − OH + ROH

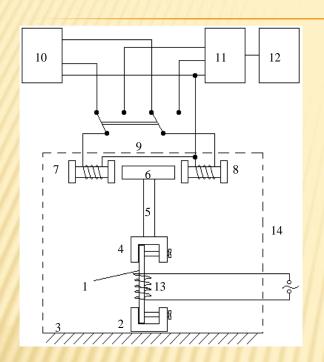
 $\stackrel{\text{ИЛИ}}{=}$
 \equiv Si − OH + RO − Si \equiv \Rightarrow \equiv Si − O − Si \equiv

+ROH

 $\stackrel{\text{ИЛИ}}{=}$
 \equiv Si − OH + HO − Si \equiv \Rightarrow \equiv Si − O − Si \equiv
+ HOH

АНАЛИЗ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ В СЕТЧАТЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЛОЯХ





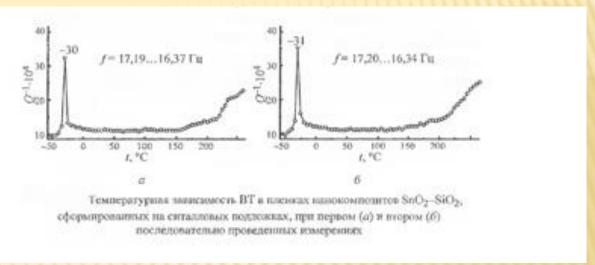
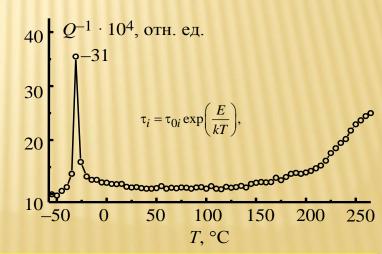


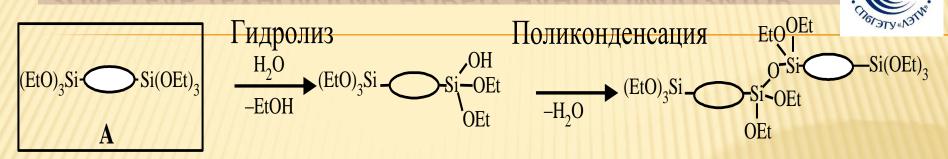
Схема установки для измерения температурной зависимости ВТ

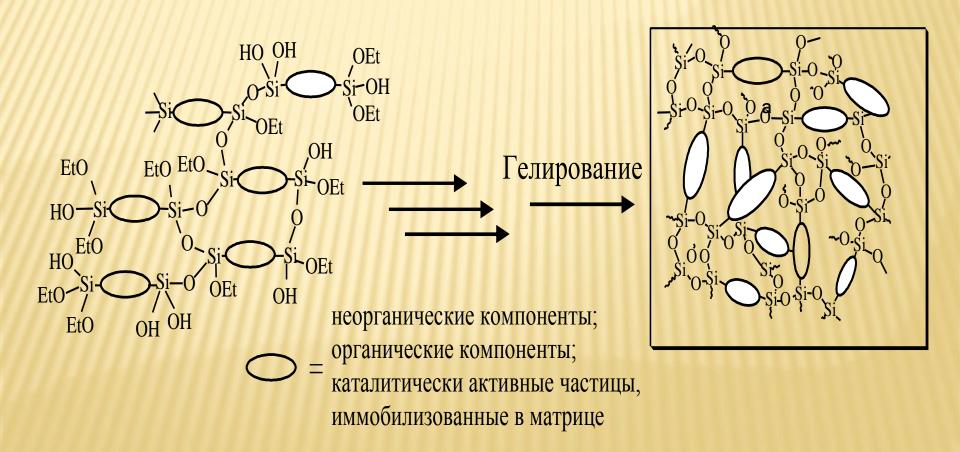
Температурная зависимости внутреннего трения образцов, сформированных на ситалловых подложках при двух последовательно проведенных операциях измерения



Ильин А.С., Максимов А.И., Мошников В.А., Ярославцев Н.П. Внутреннее трение в полупроводниковых тонких пленках, полученных методом золь-гель технологии // Физика и техника полупроводников- 2005. Т. 39. № 3. С. 300-304

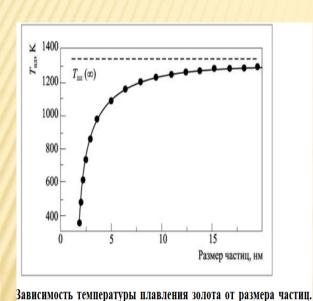
ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ НОВЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ











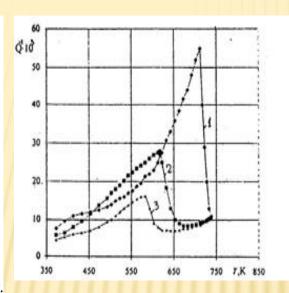


Рис. Смещение пика Вт нановключений теллура в теллуриде олова при изменении времени отжига в в динамическом вакууме: 1-8 час., 2- 16 час., 3-20 час. Уменьшение температуры плавления из-за размерных эффектов и влияния растягивающих деформаций при образовании пор.

Уравнение Гиббса-Томсона:

$$T_{\text{nn}}(r) = T_{\text{nn}}(\infty) \left(1 - \frac{2\sigma_{\text{TB.-x}}}{\Delta H_{\text{nn}}\rho_{\text{TB}} r} \right),$$

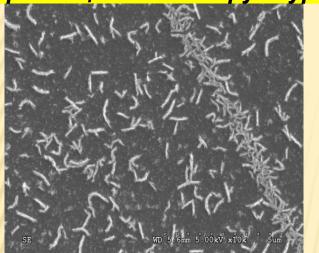
где $T_{\rm mr}(r)$ — температура плавления нанообъекта с радиусом наночастиц r, $T_{\rm mr}(\infty)$ — температура плавления обычного металла (объемной фазы), $\odot_{\rm rs.-sr}$ — поверхностное натяжение между жидкой и твердой фазами, $\Delta H_{\rm mr}$ — удельная теплота плавления, $\Theta_{\rm rs}$ — плотность твердого вещества.

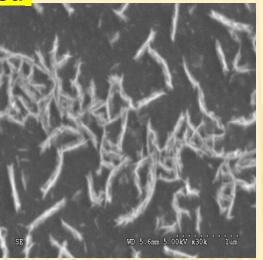
Андреев Ю.Н., Даринский Б.М., Мошников В.А. и др. Внутренне трение при изменении формы малых включений// <u>Физика</u> и техника полупроводников. 2000. Т. 34. № 6. С. 644-646

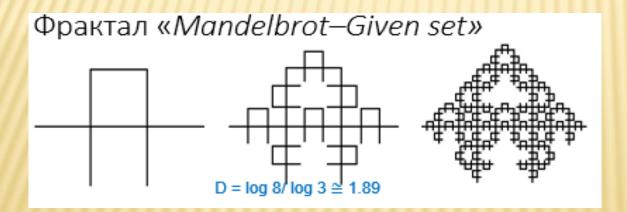
Новая нанолитография с использованием активации поверхности,

самосборки и самоорганизации. Сенсоры с фрактально-

перколяционной структурой









Фрактал Мандельброта-



Мошников В.А., Максимов А.И., Александрова О.А. и др. НАНОЛИТОГРАФИЧЕСКАЯ САМОСБОРКА КОЛЛОИДНЫХ <u>НАНОЧАСТИЦ</u> // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 18. С. 81-87.

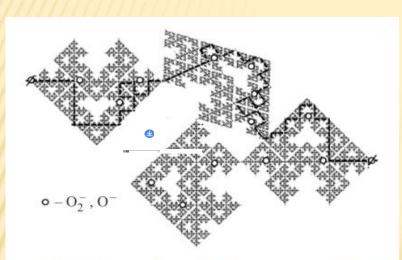


Рис. 5. Фрактально-перколяционная модель сенсорного слоя с блокированными молекулами кислорода центрами.

Из статьи: ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СЛОИ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНО-ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ СТРУКТУР Мошников В.А., Налимова С.С.,

Селезнев Б.И.

<u>Физика и техника полупроводников.</u> 2014. Т. 48. № 11. С. 1535-1539.

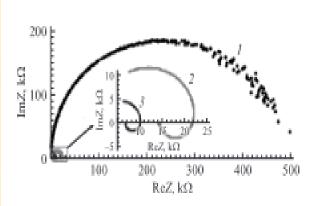


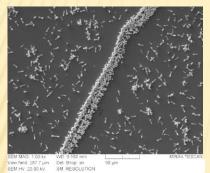
Рис. 6. Диаграммы Найквиста фрактально-перколяционных слоев: I — в атмосфере воздуха, 2 — в присутствии паров изопропяноля, I — в присутствии паров ацетова.



Таким образом, в работе показаны возможности увеличения значения газочувствительности. В основу разработанной модели положено фрактальное строение сенсорных структур в виде встроенного перколиционного кластера на пороге протекания. С вспользованием приближения на основе регулярного фрактала Мандельброта—Гивена показано, что блокировка и разблокировка проводящих вствей приводит к переходу системы через порог протекания. При взаимодействии тавой структуры с восстанавливающими газами значение газочувствительности может на несколько порядков превышать обычные значения. Объяснен экспериментально наблюдаемый индуктивный характер импедансного отклика фрактально-перколяционных слоев при низких частотах в присутствии восстанавливающих газов.

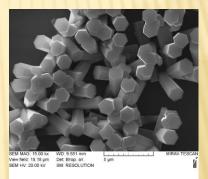
НАНОЛИТОГРАФИЯ И РОСТ ФРАКТАЛЬНО-ПЕРКОЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОГРАНЕННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ЦИНКА



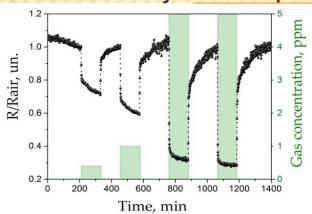


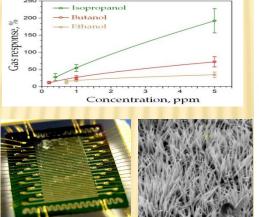
Зародышевый слой из наночастиц оксида цинка преимущественно осаждается на предварительно созданных участках неоднородности кремниевой подложки с измененной поверхностной энергией, что позволяет при дальнейшем гидротермальном росте управлять геометрией создаваемых массивов наностержней оксида цинка. Способ перспективен для

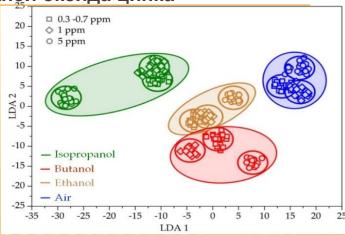
Bobkov A. A. et al. Creating Lithographic Pictures Using Faceted Zinc Oxide Microparticles on a Silicon Substrate //Technical Physics Letters. – 2018. – Vol.44. – №. 8. – pp. 694-696.



Мультисенсорный чип на основе наностержней оксида цинка







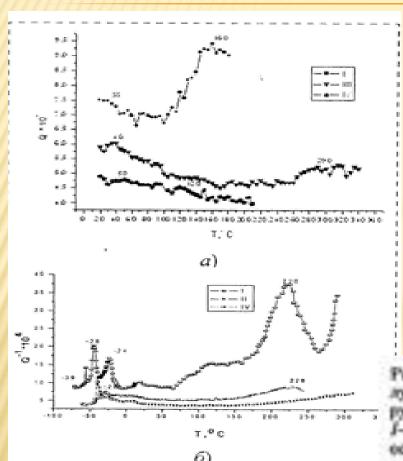
Температура детектирования 400 С

Разработаны сенсорные слои на основе наностержней ZnO, сенсибилизированные коллоидными нанокристаллами AgInS₂, функционирующие без нагрева

The Multisensor Array Based on Grown-On-Chip Zinc Oxide Nanorod Network for Selective Discrimination of Alcohol Vapors at Sub-ppm Range. Bobkov A. et al. //Sensors. – 2019. Vol. 19. – №. 19. – p. 4265.

МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ГИДРОЛИЗА, ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ И СИНЕРЕЗИСА В ЗОЛЬ-ГЕЛЬ-ТЕХНОЛОГИИ





Третья характерная группа пиков на температурной зависимости ВТ находится в интервале температур 220...300 °C. Обнаруженный эффект можно объяснить за счет явлений стеклообразования боратного стекла. Это кореллирует с представлениями о том, что в структуре пленки во время нанесения образуются микрообласти, обогащенные H₃BO₃ и B₂O₃. В процессе температурного измерения ВТ происходит дальнейшее стеклование борной кислоты и образование боратного стекла. Таким образом, в результате последовательных термообработок содержание НаВОз в этих микровключениях уменьшается. Бор может также встраиваться в кремнеземную сетку, в результате чего образуется боросиликатное стекло с более высокой температурой стеклования, чем чисто боратное. Это согласуется с тем, что в серии измерений наблюдается слвиг пиков ВТ в область более высоких температур.

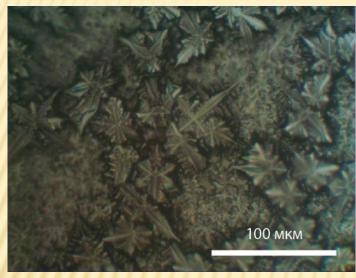
Рис. 2. Крипые ВТ для стекловидных боросиликатных илинок, получаемых из золей на основе ТЭОС без органической модифицирующей добавки (в) и с добанкой ПОУМ (б). Римскион цифрами I—IV обазначены порядковые помера термических обработок, осуществляемых при исслидовании образнов методом ВТ

Смирнова И.В., Шилова О.А., Мошников В.А. Применение наноразмерных гибридных органонеорганических пленок в качестве источников высокотемпературной диффузии бора в монокристаллический кремний //<u>Известия</u> СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2004. № 12. С. 3-9

Смирнова И.В., Мошников В.А., Шилова О.А. Исследование методом внутреннего <u>трения</u> состава и <u>структуры</u> стекловидных боросиликатных пленок, полученных из золей. //Нано- и микросистемная техника 2005 № 7 С 28-31

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ НАНОДИАГНОСТИКИ НА ОСНОВЕ ВТ, В ТОМ ЧИСЛЕ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРОВСКИТНЫХ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ





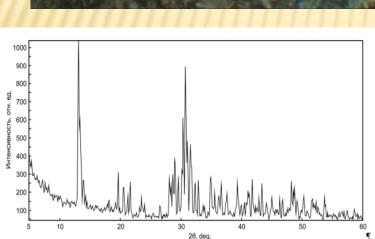


Рис.3.Рентгенодифрактограмма порошка перовскита ${
m CH_3NH_3PbI_3}$ высушенного на воздухе при-тампературе ${
m 80^{\infty}C.\P}$



Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф23РНФ-160 и Российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, https://rscf.ru/project/23-42-10029/»





THANK YOU FOR

ATTENTION













