

На правах рукописи

Гудиева Ольга Викторовна

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА И ИОННЫЙ
ПЕРЕНОС В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
НАНОСТРУКТУРАХ**

01.04.15 – физика и технология наноструктур,
атомная и молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нальчик – 2018

Работа выполнена на кафедре физики ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)»

Научный руководитель: **Созаев Виктор Адыгеевич,**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Сысоев Игорь Александрович,**
доктор технических наук, профессор.
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет» (г. Ставрополь),
директор научно-образовательного центра
Фотовольтаики и нанотехнологий

Сайханов Мусса Балдинович,
кандидат физико-математических наук,
с.н.с. ФГБУН «Комплексный научно-
исследовательский институт им. Х.И.
Ибрагимова РАН» (г. Грозный), ведущий
научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Чеченский государственный
университет» (г. Грозный)

Защита диссертации состоится «20» декабря 2018 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.076.11 созданного на базе ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» по адресу: 360004, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» и на сайте <http://diser.kbsu.ru>

Автореферат разослан _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Квашин Вадим Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Изучение физико-химических свойств наноструктурированных пленок является актуальной задачей, так как тонкопленочные системы широко используются в современных технологиях, устройствах элементной базы микро- и нанoeлектроники, особенно, в электронно-оптических приборах (ЭОП), в частности, в современных приборах ночного видения, основными элементами которых являются фотокатод и микроканальная пластина (МКП). Нанопленочные покрытия наносятся на МКП в качестве ионно-барьерных пленок для защиты фотокатодного слоя от агрессивных положительных ионов при возникновении обратной оптической связи в области фотокатода – экран. Известно, что наиболее эффективными для защиты фотокатода являются пористые наноструктурные пленки. Однако, выбор наиболее оптимальной структуры и толщины пленок теоретически не обоснован.

При уменьшении толщины пленок увеличивается их разрыхленность. Рыхлость может влиять на формирование контактов, на газопоглощение в вакуумных оптоэлектронных приборах, а также на процесс формирования фотокатода, осаждаемого на металлическую подложку. В настоящей работе ставится задача: выявить влияние разрыхления поверхности пленок на поверхностную энергию, температуру плавления и температуру контактного плавления.

Важным элементом электронно-оптических преобразователей (ЭОП) является МКП. В данной работе исследовалась нестабильность ее коэффициента усиления в зависимости от температуры спекания и восстановления в процессе ее изготовления. Электрические и электронно-оптические характеристики МКП формируются на этапе термоводородного восстановления, что предъявляет повышенные требования к очистке используемого водорода. Для очистки водорода от газовых примесей используют тонкие металлические пленки, которые являются микро и наноситами для водорода. В литературе, пока, отсутствуют теоретические модели, позволяющие оценить эффективность наноструктурных сред при очистке водорода в условиях действия приложенного электрического поля. Представляет интерес поиска наиболее оптимальных структур для очистки водорода.

В рамках данной работы ставилась задача предложить способ для изготовления эффективного материала композиционного термокатада.

В связи с развитием нанотехнологий открываются возможности конструирования новых, высокодисперсных, наноструктурированных, наноконпозиционных припоев и систем металлизации керамик и полупроводников.

Применение для армирования припоев и систем металлизации микро- и нанокристаллических порошков тугоплавких металлов и их

оксидов приводит к изменению поверхностных явлений на границе припой-твердое тело, улучшению смачивания, растворимости. В данной работе предложена методика получения армированного композиционного материала: индия с внедренными микрочастицами цинка.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Задание №3.423.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности и гранта РФФИ №13-02-00079-а.

Степень разработанности темы диссертации

В более ранних работах при контактном плавнении двух различных металлов не учитывалось влияние разрыхленности контактирующих поверхностей.

Разработке электронно-оптических преобразователей посвящено большое число как экспериментальных, так и теоретических работ, в которых показано, что наносимые на входную поверхность микроканального элемента пористые наноструктурные оксидные пленки являются наиболее эффективными средствами для защиты фотокатода. Однако, выбор наиболее оптимальной структуры и толщины пленок теоретически не обоснован. Также недостаточно выяснено влияние температуры спекания и температуры термоводородного восстановления на нестабильность коэффициента усиления при работе МКП.

При разработке методов очистки водорода от газовых примесей все шире применяются наноструктурные сита. Однако, недостаточно изучено действие электрического поля на эффективность очистки в подобных устройствах.

Цель работы: Изучение влияния толщины тонких пленок и размера микро и наночастиц на температуру фазовых переходов в металлических системах, а также процессов переноса электронов и ионов в наносистемах.

Для решения указанной проблемы были выделены следующие задачи:

1. Исследовать новые зависимости температуры плавления и температуры контактного плавления с учетом размерных эффектов и разрыхленности поверхностей пленок и наночастиц. Установить влияние внешнего давления на температуру контактного плавления тонких разрыхленных металлических пленок.
2. Изучить процессы взаимодействия микрочастиц цинка с матрицей индия при 150°C для конструирования новых, высокодисперсных припоев и систем металлизации керамик и полупроводников.
3. Разработать теорию ионного переноса в наноструктурной среде для оценки степени эффективности защиты фотокатода ЭОП.
4. Оценить вклад истинно-вторичных электронов, возникающих при

прохождении электронного потока через ионно-барьерную пленку (Al_2O_3), на разрешающую способность изображения ЭОП.

5. Предложить способ изготовления материала для композиционного термокатада.
6. Выяснить влияние температуры спекания и температуры термоводородного восстановления МКП на нестабильность ее коэффициента усиления на начальном этапе работы.
7. Разработать теоретическую модель для оценки эффективности наноструктурных сред при очистке водорода от газовых примесей в условиях действия электрического поля.

Объекты исследования:

Наноструктурные пленки K, Ca, Ni, Pt, Nb и их сплавов, барьерные структуры для защиты фотокатодов электронных устройств, микроканальные пластины, разрыхленные металлические пленки, оксидные пленки, наносита для очистки водорода от газовых примесей, композиционный материал на основе индия с добавлением микрочастиц цинка.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые получены соотношения, учитывающие влияние разрыхления поверхности пленок на их температуру плавления и температуру контактного плавления, а также соотношение, учитывающее влияние внешнего давления на температуру КП разрыхленных металлических пленок.
2. Предложена методика получения композиционного материала - индия с микрочастицами цинка. Исследована кинетика формирования контактной прослойки между микрочастицами Zn, находящимися в индиевой матрице при 150°C .
3. Впервые рассмотрено влияние перераспределения валентных электронов взаимодействующих ионов на длину свободного пробега входящих в барьерную пленку ионов. Проведена оценка степени эффективности защиты фотокатода электронного устройства. Предложена наиболее оптимальная структура ионно-барьерной нанопленки (ИБНП) для МКП на основе ВеО.
4. Впервые показано, что для улучшения разрешения электронного изображения в ЭОП, содержащих МКП с ИБНП, необходимо увеличить энергию входящих электронов до значений ~ 40 кэВ.
5. Предложен способ изготовления материала для композиционного термокатада на основе карбонильного пористого никеля, пропитанного расплавом Sn-Ba.
6. Впервые установлено влияние температуры спекания и температуры термоводородного восстановления МКП на ионно-дрейфовую нестабильность ее коэффициента усиления.

7. Проведена оценка эффективности очистки водорода наноструктурными металлическими пленками из чистых металлов (никеля, платины и их сплавов с ниобием) при добавочной ионизации входящего газового потока внешним электрическим полем. Выяснено, что нанопленка Zr, содержащая 10% Nb, является оптимальной для очистки водорода.

Теоретическая и практическая ценность результатов

Результаты данной работы могут применяться при осуществлении контактного плавления порошковых материалов нано- и микро-размеров, например, для контактно-реактивной пайки керамических и полупроводниковых материалов, расширения возможностей создания новых материалов для термокатодов. Эти данные позволяют также увеличить долговечность фотокатодов в приборах ночного видения. Предложен метод улучшения очистки водорода, что может широко использоваться в технологических процессах при создании элементов электронной техники.

Выявлены влияние температуры спекания и температуры термоводородного восстановления МКП на ионно-дрейфовую нестабильность ее коэффициента усиления, что может быть использовано для улучшения стабильности характеристик пластин в процессе их работы.

Результаты исследований были изложены в лекциях студентам факультета электронной техники СКГМИ(ГТУ) при чтении курса «Физика твердого тела».

Методология и методы исследования

В работе рассматриваются как теоретические, так и практические задачи, связанные с моделированием физико-химических свойств наноструктурированных пленок. В ней использовалась термодинамика поверхностных явлений, электронно-статистическая теория металлов, теория ионного переноса в наноструктурной среде. В экспериментальных исследованиях использовались атомно-силовая и электронная микроскопии. Разработана методика получения микро (нано) композиционного материала: индиевая матрица с микрочастицами цинка. При изучении коэффициента усиления микроканальных пластин применялась методика с использованием вакуумированного макета ЭОП.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Увеличение степени разрыхленности поверхности пленок и наночастиц ведет к понижению температуры плавления и температуры контактного плавления.
2. Учет перераспределения валентных электронов при взаимодействии входящих ионов с ионами барьерной пленки позволяет более корректно описать процесс ионного переноса через ионно-барьерную нанопленку. Для микроканальной пластины наиболее

оптимальной ионно-барьерной структурой является нанопленка на основе ВеО.

3. Улучшение разрешающей способности электронного изображения ЭОП может быть достигнуто за счет выбора значений энергий входящих в барьерную пленку электронов до 40 кэВ и толщины ионно-барьерной пленки от 50 до 280 нм. Установлено влияние температуры спекания и температуры термоводородного восстановления МКП на нестабильность ее коэффициента усиления на начальном этапе работы.

4. Теоретически установлено повышение температуры контактного плавления при увеличении внешних давлений.

5. Наиболее оптимальной структурой для очистки водорода является нанопленка Zr-10%Nb.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Полученные в данной работе результаты соответствуют пунктам 2 и 8 паспорта специальности 01.04.15 – физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика:

– Структурные, морфологические и механические свойства наноматериалов и композитных структур на их основе.

– Моделирование свойств, физических явлений и технологических процессов в наноматериалах и композитных структурах.

Обоснование достоверности, полученных в работе научных выводов

При проведении исследований были использованы современные приборы и методы. Полученные в данной работе результаты оригинальны. Их достоверность проверена системным подходом к исследованиям и сравнением с данными других исследователей, отраженными в литературе.

Личный вклад автора

Автор диссертации провел самостоятельную работу. Направления исследований задавались научным руководителем. Соавторы статей принимали участие в обсуждении полученных результатов.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации докладывались на: Третьей Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», 11-16 октября 2010 г., Нальчик; Четвертой Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», 2012; Пятнадцатом Междисциплинарном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ОДРО-15), 7-12 сентября 2012г., Ростов-на-Дону, п. Лоо; Пятнадцатом Междисциплинарном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-15), 13-18 сентября 2012г., Ростов-на-Дону, п. Лоо; Третьем

Международном Междисциплинарном симпозиуме «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» (LDS-3), 18-23 сентября 2012г. Ростов-на-Дону, п. Лоо; IV international conference on colloid chemistry and physicochemical mechanics. Москва, МГУ, 30 июня-5 июля 2013; 16 Международном симпозиуме «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-16), 7-12 сентября 2013, Ростов-на-Дону-Туапсе; 16 Международном симпозиуме «Упорядочение в минералах и сплавах» (OMA-16), 12-17 сентября 2013, Ростов-на-Дону-Туапсе; Международном симпозиуме «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ и ФП), 12-17 сентября 2013, Нальчик-Туапсе; VII Всероссийской Международной научно-практической конференции «Физические свойства металлов и сплавов», УрФУ, Екатеринбург, 11-15 ноября 2013г; Шестой Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», 1-6 июня 2014; 4-м международном симпозиуме «Физика низкоразмерных систем» 15-19 сентября 2014, г. Ростов-на Дону-п. Южный; Международном симпозиуме «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ и ФП) 16-21 сентября 2015. г. Нальчик-г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный; Двадцать первого междисциплинарного, международного симпозиума "Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ODPO-21), 4-9 сентября 2018 г. Ростов-на-Дону – п. Шепси.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 27 статей, 5 из которых опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК, а также патент РФ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из 130 страниц текста, включая 52 рисунка и 8 таблиц. Работа содержит три главы, выводы и перечень цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи исследований, перечисляются основные положения, выносимые на защиту, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе проводится анализ современного состояния исследований по размерной зависимости температуры КП.

В рамках термодинамики поверхностных явлений проанализированы известные соотношения для размерной зависимости температуры контактного плавления металлических микро- и нанопленок.

Рассмотрено воздействие внешнего всестороннего давления на размерный эффект температуры контактного плавления.

Рассмотрен процесс прохождения электронов через тонкие ионно-барьерные пленки, используемые в микроканальных пластинах, рассмотрены вопросы неустойчивости усиления МКП при ее работе.

Проведен анализ закономерностей поведения водорода в наноструктурных и тонких металлических пленках и мембранах на основе системы палладий-серебро.

Во второй главе рассматривается задача о влиянии разрыхления поверхности пленок на поверхностную энергию, температуру плавления и температуру контактного плавления.

Известно, что поверхности металлических пленок и наночастиц разрыхлены. Ранее, при оценках температуры контактного плавления это обстоятельство не было учтено.

Влияние разрыхления на поверхностную энергию (ПЭ) тонких пленок изучалось в работе [1], где показано, что ПЭ разрыхленных частиц и пленок выше, чем у гладких. Известно, что между ПЭ малых частиц и нанопленок, с одной стороны, и их температурой плавления, с другой, существуют взаимосвязи [2], поэтому температура контактного плавления может зависеть от фактора разрыхления структуры $\delta = 1 - q$ (где $q = h_g/h \leq 1$ – фактор заполнения, h_g – весовая толщина пленок; h – геометрическая толщина пленки).

Используя соотношение, связывающее ПЭ со степенью разрыхления и исходя из условия равновесия между пленкой, представляющей собой твердый раствор А в В, и расплавом в рамках концепции капиллярных эффектов П рода Л.М. Щербакова показано, что температура КП зависит от степени разрыхленности поверхности.

На рисунках 1 и 2 показаны размерные зависимости температуры плавления металлических пленок калия и кальция при различных значениях фактора разрыхления, построенных по формуле (1).

$$T(h) = T(\infty) \exp \left[- \frac{2\sigma_0\Omega}{\lambda h} \left\{ 1 - \delta(p + p_1) + 0.105p \left(1 + \frac{\delta}{6} \right) \frac{s}{h} \right\} \right], \quad (1)$$

Для построения данных кривых нами также были вычислены значения коэффициента $A = 2\sigma_0\Omega/\lambda$. Для калия $A = 3.398$ нм, а для кальция $A = 2.361$ нм.

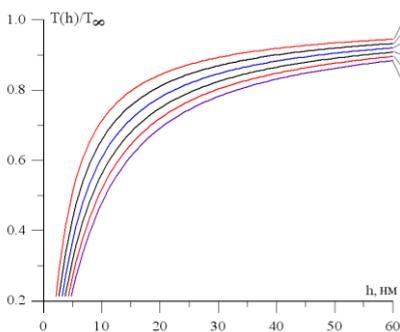


Рисунок 1. - Зависимости температуры плавления пленок кадмия от их толщины и фактора разрыхления δ : 1) $\delta = 0$; 2) $\delta = 0.1$; 3) $\delta = 0.2$; 4) $\delta = 0.3$; 5) $\delta = 0.4$; 6) $\delta = 0.5$.

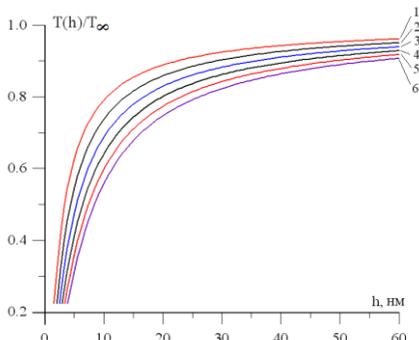


Рисунок 2. - Зависимости температуры плавления пленок кальция от их толщины и фактора разрыхления δ : 1) $\delta = 0$; 2) $\delta = 0.1$; 3) $\delta = 0.2$; 4) $\delta = 0.3$; 5) $\delta = 0.4$; 6) $\delta = 0.5$.

Из рисунков 1 и 2 видно, что с увеличением фактора разрыхления поверхности тонких металлических пленок их температура плавления понижается, особенно резко при толщинах меньше чем 40 нм.

Соответствующее уравнение для размерной зависимости температуры КП двухслойных пленок и наночастиц будет иметь вид:

$$T_{КП}(h) = T(\infty) \exp \left\{ - \frac{2\sigma_{12}\Omega}{\lambda h} \left(1 - \frac{\delta_T}{h} \right) \right\}, \quad (2)$$

где $T(\infty)$ – эвтектическая температура плавления бинарной металлической системы; σ_{12} – поверхностная энергия при $T = 0$ К макроскопической системы; λ – теплота контактного плавления; Ω – атомный объем;

$\delta_T = \frac{1}{2} \left[(\xi_1 + 3\xi) \delta + 0,5 \left| \xi \right| c \frac{a_0}{\xi_\rho} s \right]$; a_0 , c – некоторые константы;

ξ_1 , ξ_ρ , ξ – параметры, связанные с внутренней и внешней частями отдельных вкладов в поверхностную энергию; s – линейный параметр, приводящий уравнение Томаса-Ферми к безразмерному виду [2].

Формулы (1) и (2) показывают, что эффект разрыхления может влиять на температуру плавления и КП двухслойных пленок и наночастиц, а величину δ_T можно рассматривать как аналог постоянной Толмена, которая зависит от фактора разрыхления δ [2], который, в свою очередь, зависит от типа металла и способа приготовления пленки.

Известно, что при увеличении размера фактор разрыхления пленки ($\delta \sim 1/h$) уменьшается, тогда, как видно из (2), это должно приводить к

росту $T_{КП}$. Для пленок толщиной ~ 200 нм отношение $d/h \sim 7.5\%$, следовательно, это влияние, хотя и имеется, но не велико. При уменьшении толщины пленок ($h < 50$ нм) фактор разрыхления необходимо учитывать при оценке температуры контактного плавления.

Если на пленки действует внешнее давление, то для размерной зависимости температуры контактного плавления двухслойных пленок с учетом шероховатости поверхности получили:

$$T_{КП}(h) = T(\infty) \exp \left\{ \frac{\Omega}{\lambda} \left[P - \frac{2\sigma_{12}}{h} \left(1 - \frac{\delta_T}{h} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), давление приводит к увеличению температуры КП разрыхленных пленок.

Нами экспериментально была исследована кинетика формирования контактной прослойки между микрочастицами цинка, находящимися в индиевой матрице при 150°C . Показано, что оплавление начинается с острых микрочастиц в области ребер и углов, затем формируется переходная зона. После отжига в течение 1 минуты ширина зоны взаимодействия колеблется от 7 до 8 мкм.

Далее описывается способ изготовления композиционного материала для термокатода.

Для изготовления материала для композиционного термокатода использовали ленту карбонильного никеля пористостью 30% - 40%, которую вместе со сплавом Sn-Ba размещали в высоковакуумной установке. При давлении в установке 10^{-2} Па сплав состава: Ba - 0,1- 0,6, Sn-остальное подавали на карбонильную никелевую ленту через капилляр. При повышении температуры выше порога смачивания от 400°C до 650°C расплавом смачивали и пропитывали пористую ленту карбонильного никеля. Атомы поверхностно-активных добавок Ba за счет поверхностной сегрегации концентрировались на поверхности ленты и формировали более низкую работу выхода электрона из композиционного материала термокатода. Далее композиционный материал охлаждали и использовали для изготовления термокатодов. Экспериментально были изготовлены катоды, содержащие различное количество бария.

В третьей главе приводятся результаты изучения ионного переноса в тонкопленочных системах. В частности, рассмотрены результаты исследований свойств наноструктурных покрытий микроканальных пластин (МКП) оптоэлектронных преобразователей применительно к проблеме долговечности их фотокатодов. Наносимая на входную поверхность МКП достаточно тонкая наноструктура, ионно-барьерная нанопленка (ИБНП), способна задерживать положительные ионы в направлении фотокатода, которые при попадании на него воздействуют на вещество катода, уменьшая время его службы. Как показали исследования в [3], наиболее эффективными для этих целей являются пористые наноструктуры, подобные оксидным (например,

Al_2O_3). Причем, задерживаются ионы в ИБНП за счет их рассеяния на ионах барьерной структуры. Данный механизм задержания входящих в ИБНП ионов подробно исследован на основании квантово-механической атомной модели Томаса-Ферми. Нами уточнена длина свободного пробега ионов в ионно-барьерных пленках. Впервые было рассмотрено влияние перераспределения валентных электронов между ионами ИБНП и входящими ионами при их взаимодействии на заряд входящего в ИБНП положительного иона, приводящее к уменьшению длины свободного пробега этого иона.

На рисунке 3 приведены зависимости средней длины свободного пробега от энергии $\bar{R}_{npi}(E_0)$ для ионов H^+ , O^+ , CO_2^+ , входящих в пленку Al_2O_3 . Из приведенных зависимостей видно, что учет описанного нами механизма взаимодействия ведет к уменьшению \bar{R}_p , причем данные в этом случае ближе к литературным \bar{R}_{npi}^{lum} . Полученное согласие свидетельствует о достаточной корректности предлагаемой модели переноса.

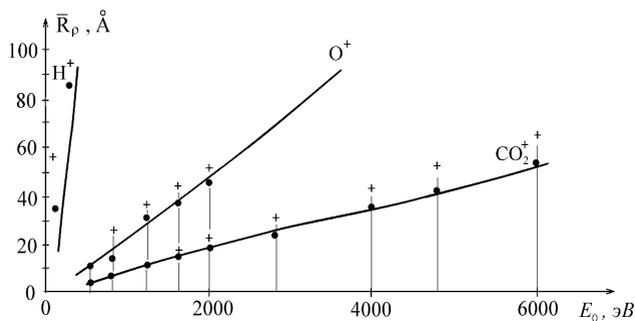


Рисунок 3 – Зависимости $\bar{R}_{npi} = f(E_0)$ для систем входящий ион-нанопленка Al_2O_3 : (●) – экспериментальные данные [4]; (+) – без учета дополнительного механизма взаимодействия ионов; (сплошные линии) – данные настоящей работы с учетом дополнительного механизма взаимодействия ионов.

В работе произведены оценки барьерности и прозрачности различных структур. Анализируя полученные данные, была выявлена зависимость прозрачности и барьерности систем «входящий ион - ионно-барьерная нанопленка» от «массового» фактора $\bar{\gamma}_i$. Показано, что ионно-барьерные свойства нанопленок на основе Al_2O_3 выражены в меньшей степени, чем для пленок BeO . Лучшие ионно-барьерные свойства пленок BeO объясняются большим сечением рассеяния для входящих ионов на

ионах ИБНП. Представляет интерес экспериментальное подтверждение полученных нами данных для этой структуры.

Далее в работе уточняется теория рождения истинно вторичных электронов в прострельной оксидной структуре Al_2O_3 и оценивается их вклад в разрешающую способность изображения в электронно-оптических преобразователях (ЭОП). На основе зависимости относительного размытия энергии электронов от толщины структуры и исходной энергии сделан вывод об уменьшении параметра разрешения $\Delta \bar{R}_i$ с уменьшением толщины структуры и исходной энергии при росте коэффициента размножения электронов $\chi_i = 1.1 \div 2.0$. Полученные данные полезны при выборе материала структуры в условиях процессов рождения истинно вторичных электронов.

В следующем параграфе третьей главы диссертационной работы приводятся результаты исследования инжекционной нестабильности МКП. При работе МКП наблюдается изменение ее коэффициента усиления. Была поставлена задача – выяснить влияние термической предыстории изготовления МКП на характер изменения ее усиления во время работы.

Нами были проанализированы данные по зависимости коэффициента усиления от прошедшего заряда для различных образцов. При низких температурах спекания (891К) и восстановления (693-723К) сразу наблюдается падение коэффициента усиления. При повышении температуры восстановления наблюдается рост коэффициента усиления на начальном участке работы МКП. При высокотемпературном спекании в начале работы всегда наблюдается рост усиления МКП. Такое поведение нельзя объяснить только десорбцией газов с поверхности каналов пластин, которое должно иметь одинаковый характер для всех пластин. Было высказано предположение, что это связано с появлением на поверхности канала МКП мигрирующих ионов щелочных металлов, переходящих при спекании при высокой температуре из стекла жилы X230 в стекло 6Ba4 канала МКП, либо диффундирующих из объема пластин при высокотемпературном термоводородном восстановлении.

На рисунке 4 показано семейство зависимостей максимального возрастания коэффициента усиления МКП на начальном участке $K(Q)$ от обратной абсолютной температуры (в градусах Кельвина) спекания МКП, а параметром является температура термоводородного восстановления.

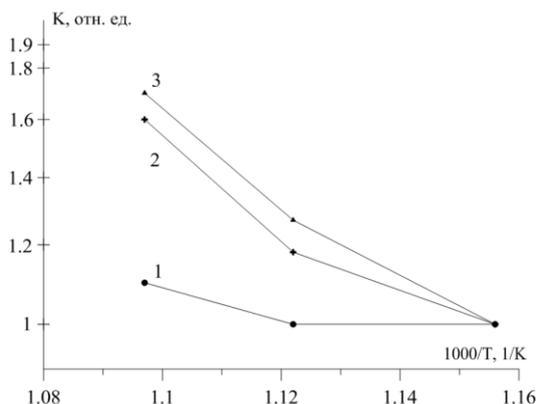


Рисунок.4. – Зависимость максимального возрастания усиления МКП (на начальном участке работы) от температуры спекания при температурах восстановления: 1- 693 К; 2-723 К; 3-743К.

Полагая, что избыточный коэффициент усиления пропорционален величине избыточного положительного заряда ионов, освобождающихся при электронной бомбардировке, можно считать, что на рисунке 4 показана зависимость роста концентрации ионов в эмиссионном слое от температуры спекания. Видно, что кривые имеют разный наклон и, соответственно, процессы имеют разную энергию активации. Участку с большей крутизной соответствует энергия активации порядка 1,1 эВ, а с меньшей крутизной - порядка 0.6 эВ. Полученные значения энергии активации коррелируют со значениями, полученными для диффузии ионов К и Na соответственно. В пользу того, что в эмиссионном слое присутствуют 2 типа ионов, свидетельствует тот факт, что наблюдаемый максимальный рост усиления не превышает 2 раз. В то время как, для достижения такого роста требуется увеличить заряд, снятый с МКП, более чем в 10 раз, а не в 2 раза, как можно было бы ожидать для однотипного процесса генерации ионов. По всей видимости, начальный рост обеспечивается более легкими ионами натрия и далее поддерживается более тяжелыми ионами калия.

В силу выявленного влияния на параметры МКП процесса восстановления, следует, что на этом этапе важна чистота используемого водорода.

Была построена теоретическая модель, позволяющая оценить эффективность наноструктурных сред при очистке водорода от газовых примесей в условиях действия приложенного электрического поля для энергий ионов $E \cong 2000 - 6000$ эВ. Получены графические зависимости приведенных длин свободного пробега ионов в среде, проницаемости и фактора барьерности среды от массы входящего иона и иона наноструктурного фильтра. Определено, что оптимальное значение массы

иона фильтрующей наноструктуры составляет 80,64 а.е.м., что соответствует соединению Zr с 10% Nb. Также было показано, что в интервале молярных масс ионов ($M=20-50$ а.е.м.) коэффициент очистки водорода от примесей повышается при добавлении к термодиффузионному потоку ионного электропереноса.

Заключение

1. Выявлено, что рост фактора разрыхления пленок приводит к уменьшению их температуры плавления и росту поверхностной энергии. При этом характер этих размерных зависимостей не изменяется во всем диапазоне толщин, но при толщинах меньше чем 10 нм они становятся более резкими.
2. Установлены размерные зависимости температуры контактного плавления (КП) разрыхленных металлических пленок и наночастиц при наличии внешнего давления. Показано, что давление приводит к увеличению температуры контактного плавления.
3. Предложена методика получения армированного композиционного материала: индия с внедренными микрочастицами цинка. Исследована кинетика формирования контактной прослойки между микрочастицами Zn, находящимися в индиевой матрице при 150°C. Показано, что скорость образования промежуточного слоя ~ 0.49 мм/ч.
4. Построена теоретическая модель выбора наиболее оптимального материала барьерной наноструктуры на входной поверхности микроканального элемента, способного задерживать положительные ионы, разрушающие фотокатоды. Показано, что наиболее эффективными в этом плане являются пористые нанопленки оксидов наиболее легких металлов, например, оксид бериллия.
5. Изучена возможность повышения разрешающего параметра изображения в ЭОП, содержащего МКП с ионно-барьерной пленкой при увеличении энергии входных электронов до значений 40кэВ.
6. Предложен способ изготовления композиционного материала для термокатода на основе карбонильного пористого никеля, смоченного расплавом Sn-Ba.
7. Выяснена связь между нестабильностью коэффициента усиления МКП и технологическими параметрами ее изготовления (температурой спекания и температурой термоводородного восстановления).
8. Произведена оценка эффективности фильтрации водорода палладиевыми фильтрами, дополненными узлом ионизации в электрическом поле входящего газового потока. Показано, что коэффициент очистки повышается при добавлении к термодиффузионному потоку ионного электропереноса для молярных масс ионов примесей от 20 до 50 а.е.м. Определена оптимальная структура для очистки водорода при приложении электрического поля на

входе фильтрующей наноструктуры. Показано, что такой структурой является нанопленка циркония, содержащая 10% ниобия.

Дальнейшее развитие темы связывается с экспериментальной проверкой некоторых теоретических выводов о влиянии внешнего всестороннего давления на физико-химические параметры тонких пленок. Предусматривается внедрение результатов НИР в производстве ЭОП нового поколения (с учетом характеристик предлагаемых ИБНП на основе ВеО) с целью улучшения разрешения ЭОП, оптимизации технологии изготовления МКП (с учетом сделанных предложений по улучшению очистки водорода), уменьшения нестабильности коэффициента усиления МКП во время ее работы.

Список цитированной литературы

- [1] Задумкин С. Н. Поверхностная энергия тонких металлических пленок / С.Н. Задумкин, Х.Б. Хоконов // ФММ.– 1962.– Т.13, Вып. 5.– С.658-662.
- [2] Задумкин, С.Н. Зависимость межфазной энергии металла на границе кристалл-расплав от размера частиц / С.Н. Задумкин, Х.Б. Хоконов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. – Нальчик: КБГУ, 1965. – С. 75–78.
- [3] Гринюк, В. Н. К методике оценки толщины нанопленок Al_2O_3 при прямом простреле их электронами энергий 0,6-1,4 кэВ / В. Н. Гринюк, П. К. Коротков, В. А. Созаев // Материалы 13-го Международного симпозиума «Порядок беспорядок и свойства оксидов», Ростов-на-Дону п. Лоо, Россия. – 2010. – С. 193-195.
- [4] Романов, В. Г. Внедрение технологического процесса нанесения прострельной пленки на МКП методом переноса / В. Г. Романов. – Отчет на НИР.-л. ЛИТМО, 1984. – 141 с.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Гудиева, О. В. Теплофизические свойства низкоразмерных структур (статья) / **Гудиева О.В.**, Коротков П.К., Созаев В.А., Чигоев Г.М., Шубин Н.Е. // Устойчивое развитие горных территорий, 2012, №4(14), с.8-15 (из перечня ВАК).
2. Ахкубекова, С.Н. Фазовые превращения между микрочастицей цинка и индиевой матрицей при температуре 150°C / Ахкубекова С.Н., **Гудиева О.В.**, Коротков П.К., Лайпанов М.З., Созаев В.А., Чигоев Г.М. // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т.78, №13 – С. 39-41 (из перечня ВАК).
3. Гудиева, О. В. Эффективность палладиевых фильтров для очистки водорода от примесей при действии электропереноса в наноситных структурах (статья) / Гринюк В.Н., **Гудиева О.В.**, Касумов Ю.Н., Созаев В.А. // Известия РАН. Серия физическая. – 2014. – Т.78, №4 – С. 469-471 (из перечня ВАК).
4. Гудиева, О.В. Температура контактного плавления малоразмерных

фаз / **Гудиева О.В.**, Камболов Д.А., Коротков П.К., Созаев В.А. // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т.79, №6 – С. 870-871. [Gudieva, O.V. Contact Melting Temperature of Small-Dimensional Phases / Gudieva O.V., Kambolov D.A., Korotkov P.K., Sozaev V.A. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics.- 2015.- Vol. 79, No. 6.- pp. 784–785.] (из перечня ВАК).

5. Гудиева, О.В. Поверхностная энергия и температура плавления разрыхленных металлических пленок / **Гудиева О.В.**, Коротков П.К., Созаев В.А., Хоконов Х.Б. // Поверхность, рентгеновские, синхротронных и нейтронные исследования, 2016, №9, С. 100-103. [Gudieva, O.V. Surface energy and the melting temperature of loosened metal films / Gudieva O.V., Korotkov P.K., Sozaev V.A., Khokonov Kh.B. // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2016, Vol. 10, No. 5, pp. 977–980.] (из перечня ВАК)

6. Гудиева, О.В. Способ изготовления материала для композиционного термокатада/ Созаев В.А., Коротков П.К., Манукянц А.Р., Касумов Ю.Н., Гудиева О.В.//Патент РФ 2643524 Оpubл.Бюллетень изобретений №4 от 2.02.2018

7. Гудиева, О. В. Размерный эффект температуры контактного плавления металлов, находящихся под давлением (статья)/ **Гудиева О.В.**, Коротков П.К., Созаев В.А.// Международная научно–техническая конференция «Микро– и нанотехнологии в электронике», 11–16 октября 2010 г., Нальчик, Каб.-Балк. ун.-т, 2010, С. 45-46

8. Гудиева, О. В. Работа выхода металлических нанонитей на границе с диэлектрической средой (статья) / **Гудиева О.В.**, Созаев В.А., Коротков П.К., Тхакахов Р.Б.// Материалы IV Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, Каб.-Балк. ун.-т, 2012, С.136-140.

9. Гудиева, О. В. Особенности физических свойств нанобъектов (статья) / **Гудиева О.В.**, Созаев В.А., Дреев З.М., Камболов Д.А., Коротков П.К.// Труды третьего международного междисциплинарного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» Low Dimensional Systems (LDS-3) 18-23 сентября 2012 г. Ростов-на-Дону - п. Лоо, С. 50-54.

10. Гудиева, О. В. Исследование свойств наноструктурных покрытий микроканальных элементов видеоэлектронных преобразователей применительно к проблеме долговечности фотокатодов электронных приборов (статья) / **Гудиева О.В.**, Гринюк В.Н., Созаев В.А., // Труды Пятнадцатого, междисциплинарного симпозиума “Порядок, беспорядок и свойства оксидов” ODPO-15 проводится с 7-12 сентября 2012г., п. Лоо, С. 96-100.

11. Гудиева, О. В. Формирование зоны перехода между микрочастицей цинка и индиевой матрицей (статья) / **Гудиева О.В.**, Ахкубекова С.Н., Коротков П. К., Лайпанов М.З., Созаев В.А., Чигоев Г.М.

// Труды пятнадцатого, междисциплинарного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-15 с 13-18 сентября 2012 г., Ростов-на-Дону - п. Лоо, с. 134-137.

12. Гудиева, О. В. Моделирование эффективности наноструктурных фильтров для очистки водорода при ионном переносе в электрическом поле (статья) / **Гудиева О.В.**, Гринюк В.Н., Созаев В.А. // Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов», Тверь, ТвГУ, 2012, Вып. 4., с. 70-74.

13. Гудиева, О. В. Эффективность защиты фотокатода электронного устройства барьерной наноструктурой на микроканальном элементе при обменном взаимодействии в системе входящий ион-структура (статья)/ **Гудиева О.В.**, Гринюк В.Н., Созаев В.А. // Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов», Тверь, ТвГУ, 2012, Вып. 4., с.75-79.

14. Gudieva, O.V. Influence of external factors on temperature of contact melting of loosened films / **Gudieva O.V.**, Korotkov P.K., Sozaev V.A., Khokonov Kh. B // Abstracts of IV international conference on colloid chemistry and physicochemical mechanics. M.: МГУ, 30 июня-5июля, 2013, с.352-354.

15. Гудиева, О. В. Размерные эффекты теплофизических свойств низкоразмерных металлических систем (статья) / **Гудиева О.В.**, Коротков П. К., Чигоев Г. М., Созаев В. А., Шубин Н. Е // Труды XVI международного симпозиума «Порядок, беспорядок и свойства оксидов» (ОДРО-16) 7-12 сентября 2013. Ростов-на-Дону – Туапсе, С. 200-208.

16. Гудиева, О. В. Эффективность палладиевых фильтров для ичистки водорода от примесей при действии электропереноса в наноситных структурах (статья) / **Гудиева О.В.**, Гринюк В. Н., Касумов Ю. Н., Созаев В. А. // Труды XVI Международного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-16) 12-17 сентября 2013. Ростов-на-Дону-Туапсе, С. 107-110.

17. Гринюк, В.Н. О вероятности выхода электронов при электрокинетическом рассеянии от металлической эмиссионной поверхности (статья) / Гринюк В.Н., **Гудиева О.В.**, Коротков П. К., Хосаев Х. С // Труды Международного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ и ФП) 17-21 сентября 2013. Нальчик-Туапсе, С. 129-131.

18. Гринюк, В. Н. О вкладе истинно вторичных электронов в формирование изображений в ЭОП-устройствах (статья) / Гринюк В. Н., **Гудиева О.В.**, Созаев В. А. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Межвузовский сборник научных трудов.- Тверь: ТвГУ, 2013, Вып. 5, с. 79-83.

19. Гринюк, В. Н. О вкладе квантовомеханической прозрачности потенциального барьера в работу выхода электронов из металла при

термоэмиссии (статья) / Гринюк В. Н., **Гудиева О.В.**, Созаев В. А. // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика». Тверь: ТвГУ, 2013, Вып. 19, №37, с. 97-102.

20. Гринюк, В. Н. О релаксационных колебаниях магнитных моментов вихревых электронов в переменном магнитном поле в бериллии различной чистоты (тезис) / Гринюк В. Н., **Гудиева О.В.**, Созаев В. А. // Материалы VII Всероссийской Международной научно-практической конференции «Физические свойства металлов и сплавов», УрФУ, Екатеринбург, 11-15 ноября 2013г., с. 15.

21. Гудиева, О.В. Размерная зависимость температуры контактного плавления нанобъектов (статья) / **Гудиева О.В.**, Камболов Д.А., Коротков П.К., Созаев В.А. // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, Каб.-Балк. ун.-т, 1-6 июня 2014

22. Гудиева, О.В. О прогнозировании параметров канального тока в холловских датчиках малых магнитных полей на полевых транзисторах с затвором Шоттки (статья) / Гринюк В. Н., **Гудиева О.В.**, Созаев В. А. // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, Каб.-Балк. ун.-т, 1-6 июня 2014

23. Гудиева, О.В. Температура контактного плавления малоразмерных фаз (статья) / **Гудиева О.В.**, Камболов Д.А., Коротков П.К., Созаев В.А. // Труды четвертого международного междисциплинарного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей» Low Dimensional Systems (LDS-4) 15-19 сентября 2014 г. Ростов-на-Дону - пос. Южный, С. 61-63.

24. Гудиева, О.В. Размерный эффект температуры контактного плавления низкоразмерных фаз // **Гудиева О.В.**, Камболов Д.А., Коротков П.К., Созаев В.А. // Межвузовский сборник научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов». Тверь: ТвГУ, 2014, Вып. 6, с. 101-104

25. Гудиева, О.В. Поверхностная энергия и температура плавления разрыхленных металлических пленок / **Гудиева О.В.**, Коротков П.К., Созаев В.А., Хоконов Х.Б. // Труды Международного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ и ФП) 16-21 сентября 2015. г. Нальчик-г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный, С. 65-71.

26. Ахкубеков, А.А. Физические основы контактного плавления нанопленок металлических систем / Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., **Гудиева О.В.**, Елекоева К.М., Коротков П.К., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. // Труды Международного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы» (ФПЯ и ФП) 16-21 сентября 2015. г. Нальчик-г. Ростов-на-Дону – г. Грозный – пос. Южный, С. 244-248.

27. Ахкубеков, А.А. Физика контактного плавления наночастиц и тонкопленочных систем / Ахкубеков А.А., Ахкубекова С.Н., **Гудиева О.В.**, Елекоева К.М., Коротков П.К., Манукянц А.Р., Созаев В.А., Хуболов Б.М. // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике», Нальчик, Каб.-Балк. ун.-т, 2015, С.79-84.

В печать __. __. 2018. Тираж 100 экз. Заказ № _____.
Полиграфический участок ИПЦ КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.