

На правах рукописи

Павлов Виктор Георгиевич

**ПОВЕРХНОСТНАЯ ДИФФУЗИЯ, ДЕСОРБЦИЯ И
КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ РОСТ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Специальность: 01.04.04 – физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Фурсей Георгий Николаевич, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», почетный профессор

доктор физико-математических наук, профессор Соминский Геннадий Гиршевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», профессор

доктор физико-математических наук, профессор Галль Лидия Николаевна, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт аналитического приборостроения Российской академии наук», заведующая лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук»

Защита состоится 10 апреля 2014г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», по адресу; 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Автореферат разослан

2014 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба присылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.205.03

кандидат физико-математических наук



Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эмиссия электронов и ионов в сильном электрическом поле позволяет получать пучки заряженных частиц с большой плотностью тока. Их использование перспективно для ряда областей науки и технологии, таких как электронная и ионная микроскопия, нанотехнологии, электронная и ионная литографии, ионное легирование полупроводников, обработка различных материалов электронными и ионными пучками, электронная накачка мощных лазеров, ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты.

Для получения сильноточных электронных и ионных пучков используются следующие механизмы эмиссии. Полевая электронная (автоэлектронная) эмиссия – выход электронов из эмиттера за счет туннельного эффекта сквозь барьер, образованный потенциальным порогом на поверхности и потенциалом внешнего электрического поля. Взрывная электронная эмиссия – импульсная эмиссия электронов при фазовом переходе конденсированное состояние–плазма на перегретых полевой электронной эмиссией участках эмиттера. Полевая ионизация – превращение молекул газа в ионы у поверхности в электрическом поле за счет перехода электронов из молекул в эмиттер. Полевое испарение и полевая десорбция – удаление в виде ионов собственных или адсорбированных атомов или молекул при приложении к эмиттеру электрического поля. Перечисленные явления происходят при напряженности электрического поля порядка 10^7 - 10^9 V/cm, которые создаются на поверхности проводящего острия с радиусом закругления вершины порядка $10 \div 1000$ nm. Окончательное формирование острия производится в вакууме с использованием поверхностной самодиффузии при нагревании острия или полевого испарения при низкой температуре. Оба эти процесса приводят к сглаживанию поверхности и увеличению радиуса острия. Нагревание острия с одновременным приложением электрического поля приводит к более сложным процессам.

Сведения о процессах на поверхности металла, протекающих в условиях одновременного воздействия электрического поля и температуры, активирующей поверхностную диффузию, важны с практической точки зрения для технологии изготовления и работы электронных и ионных эмиттеров, при использовании методик атомного зонда, полевой эмиссионной и сканирующей туннельной микроскопии. Изучение этих явлений позволяют получать данные о механизмах и параметрах процессов диффузии, роста кристаллов, самоорганизации и фазовых переходов, измерять такие величины как поверхностное

натяжение (свободная поверхностная энергия) твердых тел, энергии взаимодействия атомов и молекул.

Цели и задачи работы. Целью работы было создание физической картины явлений, происходящих на поверхности металлического кристалла при воздействии электрического поля, в условиях, когда возможно одновременное протекание процессов поверхностной диффузии собственных атомов кристалла или адсорбированных на его поверхности и их десорбции в виде ионов. Экспериментальное изучение этих процессов и построение теоретических моделей, основанных на результатах экспериментов, должно обеспечить понимание роли различных факторов, возможность предсказания результатов воздействия электрического поля в определенных условиях. В задачу работы входило также создание технологических приемов, позволяющих контролируемым образом изменять радиус острия и фактор поля остриевых эмиттеров, выравнивание многоостриевых эмиттеров по фактору поля, изучение возможности получения сильноточных и локализованных электронных и ионных пучков и исследование факторов, ограничивающих эмиссионные токи.

Методы и объекты исследования. В работе совместно используются известные методики: полевая электронная микроскопия и ионная микроскопия, а также разработанные в ходе выполнения работы новые: полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия и микроскопия высокотемпературного полевого испарения. В качестве объектов исследования выбраны два количественно противоположных по свойствам объекта: адсорбированные на поверхности тугоплавкого металла атомы щелочных и щелочноземельных металлов и собственные атомы образца из тугоплавкого металла. В первом случае исследуемые атомы имеют низкий потенциал ионизации, слабо связаны с поверхностью, передвигаются по поверхности и десорбируются при относительно низких температурах и слабых полях. Атомы тугоплавких металлов обладают высоким потенциалом ионизации, наибольшими среди металлов энергиями активации поверхностной диффузии и испарения. Соответственно, поверхностная диффузия и полевое испарение происходит при наиболее высоких температурах и напряженностях электрического поля.

Научная новизна и практическая ценность работы. Полевая десорбция щелочных и щелочноземельных металлов впервые исследовалась методом прямой регистрации десорбируемых ионов. Обнаружен немонотонный характер зависимости десорбирующего поля

от степени покрытия поверхности адсорбатом. Обнаружена возможность существования непрерывной полевой десорбции, что позволило создать новый вид микроскопии – полевую десорбционную микроскопию непрерывного действия и предложить новый тип источников ионов.

В работе детально с атомным разрешением изучены известные термополевые формоизменения (изменение формы острия-микрористалла при нагревании в электрическом поле): перестройка скругленного острия в многогранник, образования термополевых микровыступов и ступеней, а также обнаружены и изучены новые эффекты: полевой кристаллический рост на плотноупакованных гранях, высокотемпературное полевое испарение с микровыступов и углов перестроенного острия; создана новая методика – микроскопия высокотемпературного полевого испарения. В комплексе с известными методами использованы обе новые методики – полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия и микроскопия высокотемпературного полевого испарения, что позволило изучить недоступные ранее для наблюдения процессы и формы. На основании полученных результатов создана общая схема термополевых формоизменений и предложены практические приложения: методы обработки острийных эмиттеров и зондов, источники электронов и ионов большой плотности тока. Полученные в работе экспериментальные результаты расширяют представления о процессах полевой десорбции и термополевых формоизменений. Обнаруженные эффекты непрерывной полевой десорбции ионов щелочных металлов и высокотемпературного полевого испарения ионов тугоплавких металлов могут быть положены в основу ионных источников нового типа. Исследование термополевых формоизменений во всем возможном интервале режимов и предложенная общая схема формоизменений создает предпосылки для создания технологий изготовления острийных полевых эмиттеров и зондов с необходимыми свойствами и целенаправленного управляемого изменения и восстановления их формы в процессе эксплуатации.

Предложенные новые экспериментальные методики: полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия и микроскопия высокотемпературного полевого испарения существенно расширяют возможности методов полевой эмиссионной микроскопии и позволяют изучать недоступные ранее для наблюдения процессы.

Получение рекордно высоких плотностей тока полевой электронной эмиссии и рассмотрение влияния объемного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию показывают возможности

использования полевых электронных эмиттеров для получения интенсивных электронных пучков.

Достоверность результатов. Достоверность и надежность результатов обеспечена использованием комплекса современных экспериментальных методик, сравнением полученных результатов с теоретическими моделями, подтверждением результатов другими исследователями.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментальное обнаружение новых эффектов: полевой кристаллический рост, полевое испарение ионов металла при термополевых формоизменениях, непрерывная полевая десорбция ионов щелочных и щелочноземельных металлов.
2. Разработка и использование новых экспериментальных методик: полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия и микроскопия высокотемпературного полевого испарения.
3. Исследование с использованием новых методик термополевых формоизменений в широком интервале изменения режимов. Создание общей схемы термополевых формоизменений, определение механизмов формоизменений, определение режимов различных формоизменений для ряда тугоплавких металлов.
4. Измерение методом прямой регистрации десорбируемых ионов немонокотонной зависимости десорбирующего поля от степени покрытия поверхности адсорбатом.
5. Использование термополевых формоизменений для управления параметрами полевых электронных эмиттеров: уменьшение и увеличение радиуса острия, выравнивание многоострийного эмиттера по фактору поля, локализация электронной и ионной эмиссии вплоть до размеров одного атома.
6. Получение рекордной плотности тока полевой электронной эмиссии близкой к теоретическому пределу из эмиттеров, подвергнутых термополевому формированию. Уточнение модели, описывающей влияние объемного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию и ограничивающей максимальные эмиссионные токи, и выявление завышения величины этого ограничения в предыдущих теоретических работах.
7. Новые типы источников ионов металлов, использующих обнаруженные эффекты непрерывной полевой десорбции щелочных металлов и высокотемпературного полевого испарения тугоплавких металлов, позволяющих получать локализованные в узком телесном угле потоки ионов с большой плотностью тока.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 53 отечественных и международных конференциях, изложены в 37 статьях в рецензируемых журналах (в том числе, в 30 статьях в журналах из перечня российских научных журналов, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук), 21 статье в сборниках, 8 авторских свидетельствах на изобретение и в 48 тезисах докладов на конференциях.

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертации результаты получены с личным участием автора. Без соавторов выполнены 7 вошедших в диссертацию работ. В совместных работах автор участвовал в выработке задачи, в подготовке и проведении экспериментов, в анализе и обсуждении полученных результатов, написании работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 5 глав, общих выводов, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 255 страниц, включая 65 рисунков, 5 таблиц, оглавление и список литературы, состоящий из 277 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

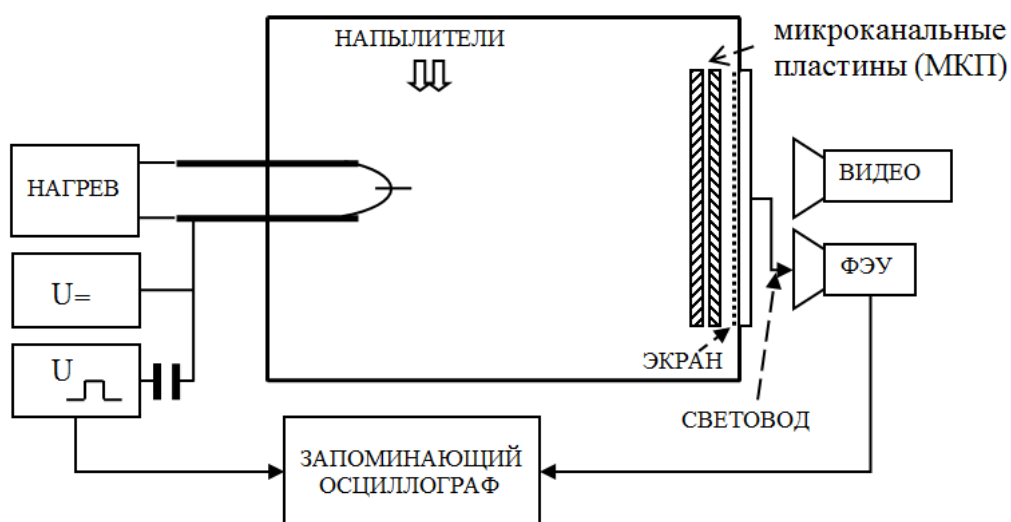
В первой главе писано научное направление, в котором выполнена работа, и состояние исследований в этой области, обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая ценность результатов работы, сформулированы выносимые на защиту положения.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик. Исследуемый образец выполнен в форме острия с радиусом закругления $\sim 0.01 \div 1 \text{ мкм}$. При подаче потенциала (V) у поверхности острия создается электрическое поле с напряженностью: $F = \beta V$, где β – так называемый "фактор поля". При отрицательном потенциале на острие из острия идет полевая электронная эмиссия. В полевой ионной микроскопии острие находится под положительным потенциалом, в прибор напущен "изображающий" газ, молекулы которого превращаются в ионы у поверхности острия. В полевой десорбционной микроскопии используется эмиссия ионов при полевой десорбции и полевом испарении. Эмитируемые частицы двигаются по расходящимся траекториям и создают на экране увеличенное изображение острия. Увеличение по порядку величины равно отношению расстояния от острия до экрана к радиусу острия. Плотность тока полевой электронной эмиссии зависит от напряженности поля и работы выхода. Получаемые изображения отражают распределение по поверхности работы выхода и напряженности электрического поля. Усиление поля на выпуклых

участках используется в работе для изучения термополевых формоизменений. Зависимость от работы выхода используется для измерения степени покрытия поверхности адсорбатом и для изучения зависимости полевой десорбции от работы выхода. В полевой ионной микроскопии возможно получение изображений с атомным разрешением. Последовательным полевым испарением атомных слоев можно проследить внутреннюю структуру объекта. Эта методика использована для определения структуры образований, получающихся при термополевом воздействии.

Для детектирования ионов и получения полевых эмиссионных изображений используется сборка из двух микроканальных пластин (МКП) диаметром 56 мм и люминесцентного экрана (рис.1).

Рис. 1



Щелочные металлы наносились на острие из сверхвысоковакуумных источников ИНО-34-9 (Na), ИКО-34-9 (K) и ИЦО-20-9 (Cs). Острие нагревалось пропусканием тока через дужку, к которой оно приварено. Входная поверхность МКП заземлена, на выходной $+1 \div 2.5$ kV, на экране $+4 \div 8$ kV. Система позволяла регистрировать единичные электроны и ионы. Изображения снимались фотоаппаратом, скоростной кинокамерой или видеокамерой. Для измерения яркости свечения люминофора и локальных эмиссионных токов использовался фотоэлектронный умножитель. Массы ионов определялись по времени пролета от острия до МКП. На острие через разделительный конденсатор подается импульс напряжения ($1 \div 5$ ns, $1 \div 5$ kV), который суммируется с постоянным напряжением. Сигнал от десорбировавшихся ионов преобразуется в световой импульс, который регистрируется с помощью ФЭУ. Время между десорбирующим и детектируемым импульсами измеряется с помощью запоминающего осциллографа. Световой сигнал снимался со

всего экрана или с помощью диафрагмы или гибкого волоконно-оптического световода с части экрана.

Острия изготавливались из металлических проволок диаметром $0.1 \div 0.15$ mm с помощью анодного электролитического травления. Для изготовления острия с короткой конической частью разработаны специальные способы. На 2 из них были получены авторские свидетельства на изобретения [A1, A2]. Окончательное формирование и очистка острия осуществлялась прогревом в вакууме в экспериментальных приборах. Формирование вольфрамового острия происходило при $T \sim 2800$ K в течение ~ 1 часа. В результате образовывалась «форма отжига» – острие со скругленной вершиной, на которой имеются плоские участки плотноупакованных плоскостей. Напряженность поля определялась из вольтамперных характеристик Фаулера-Нордгейма. Температура острия измерялась в высокотемпературной области оптическим микропирометром, а в низкотемпературной (ниже 1000 K) – по изменению электрического сопротивления металлической дужки, к которой приварено острие. Давление остаточных газов не превышало 10^{-10} Torr.

Третья глава посвящена исследованию полевой десорбции щелочных металлов и описанию новой экспериментальной методики – полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия. До нашей работы полевая десорбция щелочных и щелочноземельных металлов исследовалась с помощью полевой электронной микроскопии: на острие с адсорбатом подавался на положительный потенциал, затем при отрицательном потенциале наблюдались эмиссионные изображения и измерялись эмиссионные характеристики [1]. Выявленные закономерности в общих чертах состояли в следующем: при достижении десорбирующего поля десорбируется весь адсорбат с вершины острия в форме импульса ионного тока; десорбирующее поле растет с увеличением степени покрытия и уменьшается с ростом температуры. Полевая десорбция щелочных металлов описывается моделью испарения иона через барьер Шоттки. Энергия активации: $Q = \Lambda + I - \phi - e^{3/2} F^{1/2}$, где Λ – энергия десорбции нейтрального атома, I – потенциал ионизации атома. При полевой десорбции концентрация адсорбата уменьшается, что приводит к повышению работы выхода, к росту интенсивности полевой десорбции и к десорбции всего адсорбата при достижении определенного значения напряженности поля.

Метод непосредственной регистрации десорбируемых ионов [A16, A17] позволил уточнить эту картину. Обнаружен немонотонный характер

зависимости десорбирующего поля от степени покрытия (θ) с максимумом вблизи покрытия (θ_{opt}), соответствующего минимуму работы выхода [A23]. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости десорбирующего поля для десорбции Cs с W. Подобные зависимости были получены и для других (K, Na, Ba) металлов. Масс-анализ показал, что десорбция щелочных металлов происходит в основном в виде однозарядных моноатомных ионов (Na^+ , K^+ , Cs^+). В некоторых случаях наблюдалось появление молекулярных ионов типа Cs_2^+ и Cs_3^+ , число которых не превышало нескольких процентов от количества моноатомных ионов. При $\theta < \theta_{opt}$ десорбция происходит в виде импульса ионного тока с удалением всего адсорбата. При $\theta > \theta_{opt}$ процесс сложнее. После десорбции нескольких ионов десорбция прекращается. При последующем подъеме напряжения десорбция продолжается и, когда напряженность поля достигает значений на прямых b-c, весь адсорбат десорбируется в виде импульса ионного тока. Форма кривой $F_{des}(\theta)$ определяет характер десорбции. Десорбция уменьшает концентрацию адсорбата, и если $\theta < \theta_{opt}$, то растут работа выхода и превышение F над F_{des} .

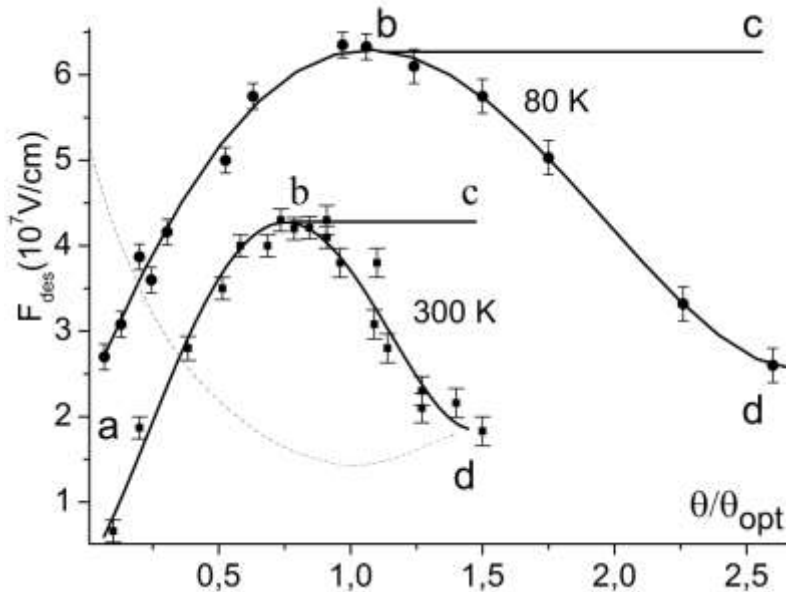


Рис. 2. Зависимость напряженности десорбирующего поля (F_{des}) от степени покрытия (θ) поверхности вольфрама цезием. Штриховая кривая – зависимость работы выхода. θ_{opt} соответствует минимуму работы выхода.

Положительная обратная связь между уменьшением θ и скоростью десорбции вызывает лавинообразное ускорение десорбции и импульс десорбируемых ионов. При $\theta > \theta_{opt}$ десорбция приводит к понижению работы выхода и к уменьшению интенсивности десорбции. Точка, изображающая состояние на поверхности (θ, F), сдвигается влево по кривой d-b. При достижении прямой b-c происходит переход к повышению работы выхода. Наблюдается импульс ионного тока.

Поверхностная диффузия вносит изменения в процесс. Положительный заряд адсорбированных атомов и наведенный в

подложке отрицательный заряд образуют электрический диполь. При положительном потенциале острия подложки атомы затягиваются в сторону усиления поля на вершину острия [2]. Десорбция уменьшает концентрацию, возникают градиент концентрации и движущая сила поверхностной диффузии, совпадающая по направлению с движущей силой неоднородного поля. Была обнаружена возможность непрерывной полевой десорбции с диффузионным поступлением адсорбата в область десорбции. На экране стационарный поток ионов создавал изображения, которые изменялись с изменением режимов. Обнаружение непрерывной полевой десорбции позволило решить несколько задач. Создана новая методика – полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия [A17, A23, A29], предложен новый тип ионных источников [A18, A19, A24], исследован механизм шумов в вакуумных электронно-оптических преобразователях и разработаны способы борьбы с ними [3, 4].

Главный вывод из проведенных экспериментов – установление немонотонной зависимости десорбирующего поля от покрытия и возможность непрерывной полевой десорбции.

Полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия. Основателями полевой десорбционной микроскопии являются Гаврилюк и Медведев [5]. Микроскоп работал в импульсном режиме и адсорбат (литий) на изображаемую поверхность поступал в промежутках между импульсами за счет поверхностной диффузии. Обнаружение непрерывной полевой десорбции позволило перейти к непрерывному режиму работы, и появился новый вид микроскопии – полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия. Механизм формирования изображения отличается от остальных видов полевой эмиссионной микроскопии, поскольку процессы полевой десорбции и поверхностной диффузии протекают одновременно, и оба они влияют друг на друга и на формируемое изображение. Поток ионов с определенного участка сложным образом зависят от режимов работы микроскопа и от распределения концентрации адсорбата, которое создано предшествующими изменениями режимов. Получаемые картины зависят от многих факторов, что позволяет подобрать условия для изображения различных объектов. На изображениях наблюдаются отдельные атомы и их скопления, моноатомные ступени и ряды, границы зерен, грани, ребра, вершины многогранных углов и другие особенности. На рис 3. примеры десорбционных изображений а и б иллюстрируют изменение характера изображения (инверсию) при изменении режимов.

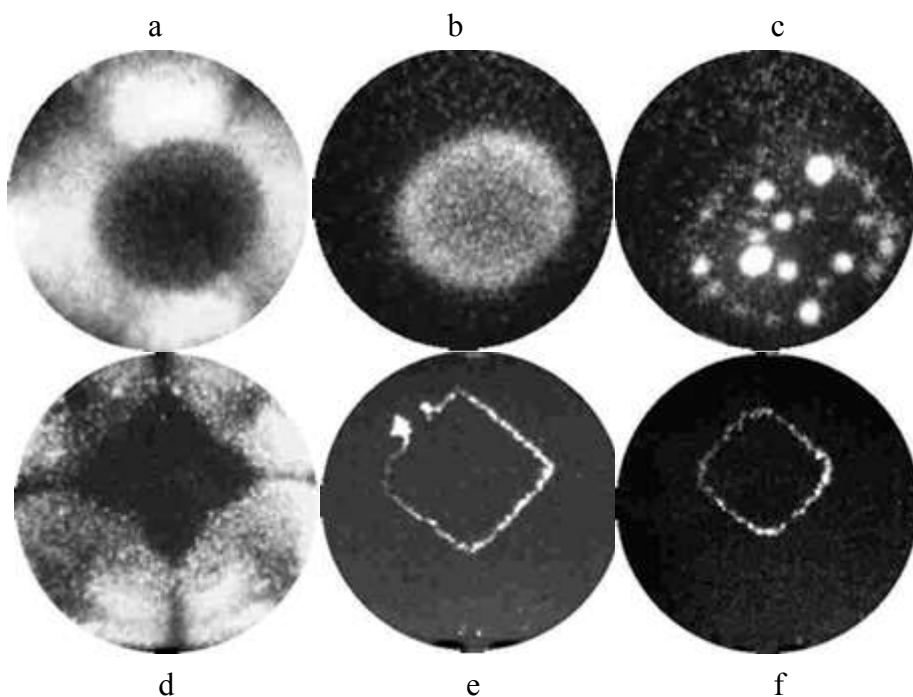


Рис 3. Примеры полевых десорбционных изображений непрерывного режима. Размеры изображаемой части образца ~100 нм, высота ступеней (рис. e, f) ~0.2 нм.

Особенность методики, состоящая в возможности наблюдать участки с низкой напряженностью поля и высокой работой выхода, позволяет изучать изменение формы граней или получать изображения островков золота на этой грани (с). На рис. 3 d-f приведены изображения иридиевого острья. Изменяя режимы можно подобрать подходящие условия для наблюдения различных особенностей. При некоторых условиях на изображении присутствует контур одной моноатомной ступени (e и f). При изменении напряжения изображение "перескакивает" на другую ступень. Такое поведение нельзя объяснить только зависимостью полевой десорбции от напряженности поля. Ведь если при данном напряжении поле было достаточно для полевой десорбции с края ступени, то при повышении напряжения создаются условия для десорбции с других ступеней с меньшим локальным усилением поля, но сохраняются условия и для десорбции с прежней ступени. Объяснение состоит том, что предварительно напряжение было поднято до десорбции всего адсорбата с вершины острья. При последующем снижении напряжения адсорбат "наползает" на вершину. Условия для десорбции есть в узком поясе вокруг вершины. Десорбция с вершины не идет – там нет адсорбата. С наружной стороны пояса адсорбат понижает работу выхода ниже порога полевой десорбции.

Полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия позволила изучить ряд интересных процессов. Например, образование и трансформацию наноразмерных включений графита в аморфном углероде [6] и золота в соединении золота со щелочными металлами [A27, A31,

A36], структуру и эмиссию графена на иридии [A52, A58]. Химическое взаимодействие адсорбатов (изображающего с исследуемым) приводит к неожиданным результатам. Так при непрерывной полевой десорбции K и Cs с W в присутствии золота обнаружены колебания тока полевой десорбции при неизменных режимах [A26].

Непрерывные полевые десорбционные изображения получаются в широких интервалах режимов (поле, температура, поверхностная концентрация адсорбата). Перечисленные параметры взаимно зависят друг от друга. С учетом этого замечания можно привести интервалы режимов получения изображений для различных изображающих адсорбатов. От материала подложки пределы параметров зависели слабо. Для Cs интервал полей $F=1\div 5 \times 10^7$ V/cm и температур $300\div 400$ K, для K – $F=1\div 6 \times 10^7$ V/cm и $T=300\div 500$ K, для Na и Ba – $F=2\div 8 \times 10^7$ V/cm и $T=400\div 800$ K. С изменением режимов изменяются и свойства полевых десорбционных изображений. При низких температурах изображение более резкое, с большим разрешением, но изображаются только отдельные детали. При повышении температуры значительно увеличивается яркость изображения и площадь изображаемого участка, но падает разрешающая способность. Медведев, Сухорский и Блок также обнаружили возможность перейти к непрерывному режиму в литиевом десорбционном микроскопе [7]. Таким образом, метод полевой десорбционной микроскопии непрерывного режима дополняет методику полевой эмиссионной микроскопии и расширяет возможности полевых эмиссионных методов и круг исследуемых объектов и процессов.

В четвертой главе описаны исследования процессов изменения формы металлических кристаллов при нагревании в сильном электрическом поле (термополевые формоизменения). Основные сведения об этих процессах получены методами полевой эмиссионной микроскопии при исследовании микрокристаллов в форме острия [8-12] и было известно следующее. При нагревании без поля острие затупляется и укорачивается. Приложение поля любого направления уменьшает скорость затупления и при определенной напряженности F_0 останавливает его. Превышение над F_0 не вызывает вытягивание и обострение острия. Вместо этого наблюдается переход от частично скругленного острия к форме многогранника. Наблюдаемые процессы объяснялись поверхностной самодиффузией, определяемой действием двух противоположно направленных давлений: сжимающего давления поверхностного натяжения и растягивающего давления электрического поля на поверхность проводящего тела. Отсутствие заострения объяснялось

трудностью зарождения новых атомных слоев на плотноупакованных гранях. Приходящие с боковой поверхности атомы встраиваются в решетку на менее плотно упакованных гранях, эти грани уменьшаются в размерах и исчезают. После огранки острия наблюдалось образование микровыступов на углах многогранника

Термополевые формоизменения использовались для научных исследований и в практических приложениях: измерение поверхностного натяжения твердых тел и энергии активации поверхностной самодиффузии; эмиттеры электронов произвели революцию в электронной микроскопии [13-17].

Микроскопия высокотемпературного полевого испарения. Влияние полевого испарения на термополевые формоизменения предполагалось со времени работы Дрекслера [18], в которой он предположил, что рост обнаруженных им ступеней ограничен полевым испарением с вершин ступеней. Однако прямого подтверждения полевого испарения при термополевых формоизменениях долго не было. Обнаружить его удалось [A15] методом прямой регистрации ионов в полевом эмиссионном микроскопе (рис. 1). Потоки ионов вольфрама создавали на экране пятна, которые передвигались по экрану с большой скоростью. Перемещение пятен снималось скоростной кинокамерой или видеокамерой. Наблюдая эти перемещения, можно непосредственно во время термополевой обработки проследить происходящие изменения формы острия.

Используемый комплекс методик. Полевая эмиссионная микроскопия позволяет наблюдать выступающие участки, усиливающие поле. В электронном микроскопе виден профиль кристалла. В обоих случаях остаются ненаблюдаемыми области между выступающими частями. Для преодоления этих недостатков использованы новые методики. Информацию о недостаточно изученных участках поверхности и о форме острия непосредственно после термополевой обработки предоставила полевая десорбционная микроскопия непрерывного режима. Процессы, происходящие во время термополевой обработки, можно наблюдать методом микроскопии высокотемпературного полевого испарения.

Основная схема проведения экспериментов: острие нагревалось до требуемой температуры, затем к нему прикладывался электрический потенциал положительной полярности, изображение полевого испарения записывалось видеокамерой, после завершения термополевой обработки выключался нагрев острия и, после его охлаждения снималось напряжение с острия. После этого снимались вольтамперные характеристики полевой электронной эмиссии и полевые электронные

изображения. На острие наносились Cs или K и наблюдались полевые десорбционные изображения при вариации электрического поля. Температура острия при этом постепенно повышалась, начиная с комнатной. После того как температура доходила до термической десорбции изображающего адсорбата, снова снимались характеристики полевой электронной эмиссии и полевые электронные изображения.

Перестройка скругленной вершины острия в многогранник. Полевая десорбционная микроскопия позволила изучить подробности процесса перестройки. На рис.4 приведены примеры эмиссионных изображений и схемы образующегося при перестройке трехгранного угла $\langle 111 \rangle$.

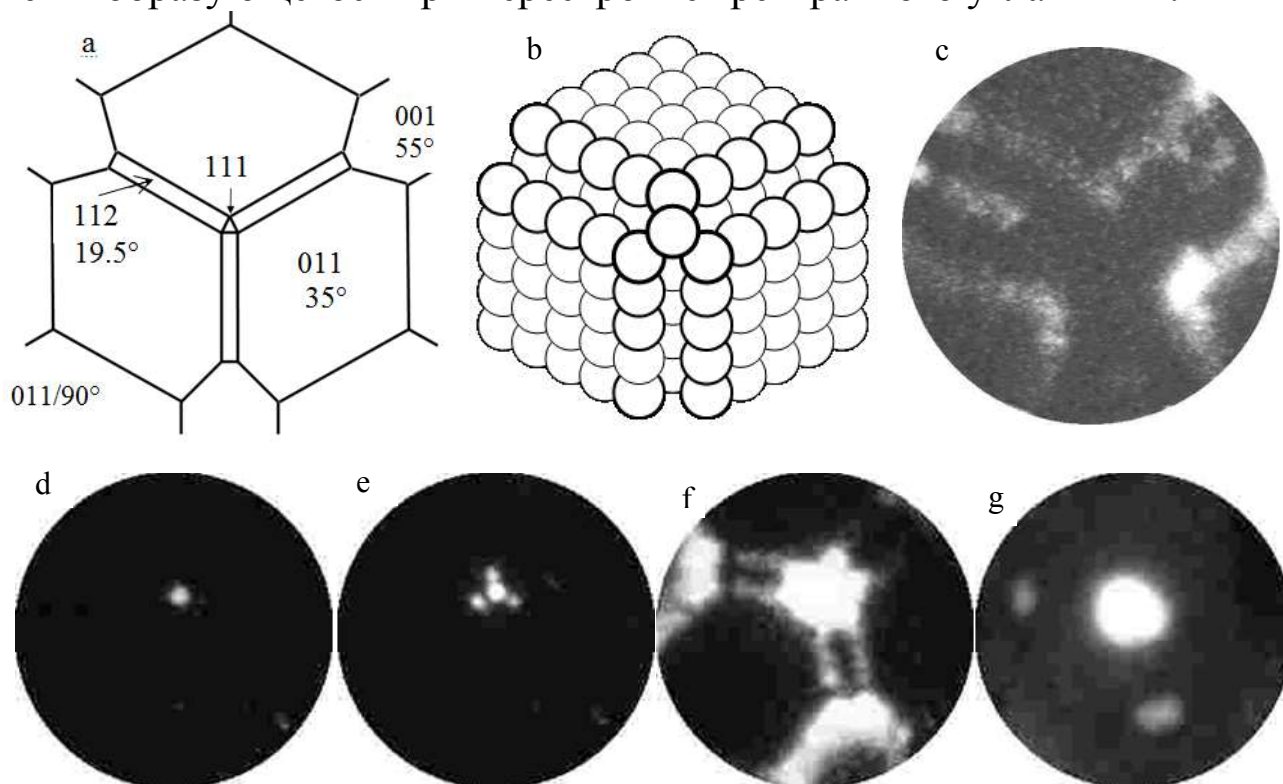


Рис. 4: Схемы (a,b), полевые десорбционные (c-f) и электронное (g)

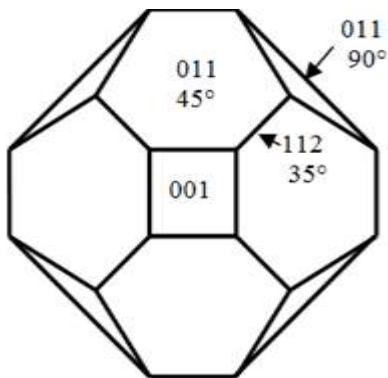
изображения трехгранного угла перестроенного вольфрамового острия

В общем случае перпендикулярно оси угла сохраняется плоскость (111) в форме треугольника или шестиугольника, ребра угла составляют длинные плоскости {112} или ступени этих плоскостей. Рост нового слоя на грани (112) начинается с зарождения и роста моноатомного ряда на плоскости (рис.4с). Конечным этапом является угол с единичным атомом на вершине (рис.4b, d-g). Каждое ребро состоит из двух моноатомных рядов $\langle 111 \rangle$. Размеры плоскостей {011} и длина ребер угла в приведенном примере $\sim 0,5\mu\text{m}$. К выступам в форме пирамиды с одним атомом на вершине проявляется большой интерес и для их изготовления применяются сложные методы [19-20]. Используемый в данной работе способ представляется более простым, а форма – более стабильной по

сравнению с пирамидками нанометрового размера. Полевое испарение усложняет наблюдаемые процессы формоизменения на всех стадиях перестройки. На форму угла $\langle 111 \rangle$ оно влияет как при испарении с самого угла, так и с противоположных концов ребер. Обнаружены три режима существования микровыступов. В первом случае, полевое испарение продолжалось все время эксперимента. Второй – периодическое появление и исчезновение полевого испарения микровыступов. В третьем – изображение микровыступов периодически появлялось, затем передвигалось от угла вдоль ребра и исчезало. Атомно острый угол получался при отсутствии полевого испарения.

Термополевые наросты. В ряде случаев после термополевой обработки полевое электронное изображение состояло из ярких пятен – изображений микровыступов, разбросанных практически по всему полю. Прогрев острия приводит к затуплению микровыступов и их полному сглаживанию. Исчезновение микровыступов позволило изучить форму поверхности. На плотноупакованных гранях перестроенного острия имелись наросты, размеры которых ($\sim 100\text{nm}$) намного превышают размеры термополевых микровыступов. В связи с этим первоначально они получили название – макронаросты [А7]. В данной работе используется термин наросты, а образований с размерами $\sim 1\text{nm}$ – «микровыступы». Встречаются другие названия. Наросты называются макронаростами, микровыступами, большими микровыступами, микровыступы – малыми микровыступами, нановыступами [12, 21]. Полевая ионная микроскопия показала, что наросты имеют правильную структуру и состоят из усеченных пирамид, поставленных друг на друга. В работах Г.Н. Фурсея с сотрудниками использовались просвечивающая электронная микроскопия [12, 22]. На теневых картинах наросты видны в виде трапеций. Термополевые формоизменения при отрицательном потенциале острия также приводили к появлению пирамидальных наростов [12, 23]. Эти эксперименты подтвердили механизм кристаллического роста на гранях острия из атомов, приходящих с его боковой поверхности. Таким образом, обнаружен кристаллический рост на плотно упакованных гранях при термополевых формоизменениях, возможность которого отрицалась в предыдущих работах.

Полевая десорбционная микроскопия позволила уточнить выводы о механизмах образования наростов и микровыступов и их форме. Встречаются наросты форма, которых отличается от пирамидальной. Верхняя часть нароста является усеченной четырехгранной пирамидой. Боковая поверхность состоит из плоскостей $\{011\}$ под углом 45° к



основанию, и плоскостей $\{011\}$ перпендикулярных основанию. Изменение формы с высотой может объясняться ослаблением поля на нижней части нароста.

Рис. 5. Схематическое изображение формы нароста, цифрами обозначены плоскости и их наклон к плоскости рисунка

Изменение радиуса острия при термополевой обработке определялось по изменению наклона характеристики Фаулера-Нордгейма после термополевой обработки и прогрева без поля до возвращения острия к форме отжига. При всех стадиях перестройки в многогранник, поле не влияет на изменение радиуса с точностью 0,5%. Появление наростов в определенных условиях оказывало влияние на радиус острия

Для проверки общности наблюдаемых на вольфраме явлений были проведены эксперименты с остриями из других металлов (Mo, Ta, Nb, Re, Ir). Для всех металлов наблюдались те же виды формоизменений, что и на вольфраме: перестройка в многогранник, образование наростов и микровыступов. Отличия в наблюдаемых процессах и формах были связаны с различиями кристаллических решеток и таких параметров как температура плавления, энергии испарения и поверхностной диффузии.

Общая схема термополевых формоизменений. При составлении схемы использованы полученные результаты и идеи работ [8, 10, 18, 24-27]. При высокой температуре на поверхности острия происходят: отрыв атома от ступени, поверхностная диффузия, присоединение атомов к ступеням, зарождение новых атомных слоев. В отсутствие электрического поля перенос вещества направлены в сторону уменьшения кривизны поверхности. Слои на вершине острия разрушаются, а на боковой поверхности растут. После длительного прогрева процессы приходят в равновесие. Электрическое поле вносит вклад пропорциональный F^2 в поверхностную энергию, нарушает равновесие и поворачивает потоки переноса. На вершине острия происходит кристаллический рост, сначала на «рыхлых», скругленных участках поверхности, затем на менее плотно упакованных плоскостях. Атомы захватываются этими участками, поэтому на плотно упакованных гранях концентрация мала для возникновения зародышей нового слоя. Когда места захвата атомов исчезают, на гранях создается пересыщение, достаточное для зарождения новых слоев. Если на гранях происходит рост слоев, заполняющих всю грань, то острие сохраняет форму многогранника. Зарождение нового

слоя может произойти до завершения роста предыдущего, рост нижележащего слоя замедлится из-за захвата части атомов новым слоем. Верхний слой может догнать нижний с образованием ступени удвоенной высоты. Последовательный рост слоев приведет к росту пирамидального нароста. Этот же процесс может привести к образованию микровыступа у края растущей ступени. Пересыщение у края грани больше, чем в центре из-за большей напряженности поля и из-за того, что приток атомов происходит через край. Процесс роста может принять лавинообразный характер из-за повышения напряженности поля с увеличением высоты микровыступа. Рост микровыступа и полевое испарение с одной стороны, и рост слоев с другой, являются конкурирующими процессами, так как оба ведут к уменьшению концентрации атомов. Это может объяснить колебания тока полевого испарения и широкий интервал температуры, в котором, наблюдается полевое испарение с микровыступа. Во время роста слоя концентрация и полевого испарения уменьшаются. После завершения слоя и до зарождения нового полевого испарения возобновляется. Если полевое испарение превысит диффузионный приток, равновесие рост–разрушение слоев сместится в сторону разрушения, начнется удаление материала разрушающихся слоев через полевое испарение. Вершина острья в форме многогранника с наростами на гранях и микровыступами отступает.

Зависимость формоизменений от режимов термополевой обработки. На рис.6 приведена обобщенная безразмерная схема режимов термополевой обработки для тугоплавких металлов. Для получения этой схемы использованы результаты экспериментов с острьями из 6 металлов (W, Mo, Ta, Nb, Ir, Re). По оси абсцисс отложено отношение температуры острья к температуре плавления металла, по оси ординат – отношение напряженности поля термополевой обработки к напряженности поля, давление которого уравнивает давление поверхностного натяжения на острие данного радиуса из данного металла. Конечно, по этой схеме нельзя точно определить режимы для получения определенного формоизменения конкретного острья. Однако схема помогает ориентироваться в термополевой обработке и находить примерные интервалы режимов. Схематические фигуры, обозначающие определенные типы формоизменений, обозначены теми же цифрами, что и области режимов в которых они наблюдаются: 1 – процессы перестройки острья в многогранник или образования ступеней; 2 – полная перестройка – огранка острья наиболее плотно упакованными плоскостями; 3 – появление микровыступов на перестроенном острие или

ступенях; 4 – кристаллический рост преимущественно на вершине перестроенного острия; 5 – рост наростов на гранях перестроенного острия; 6 – превышение скорости полевого испарения над диффузионного притоком с боковой поверхности, отступление вершины острия.

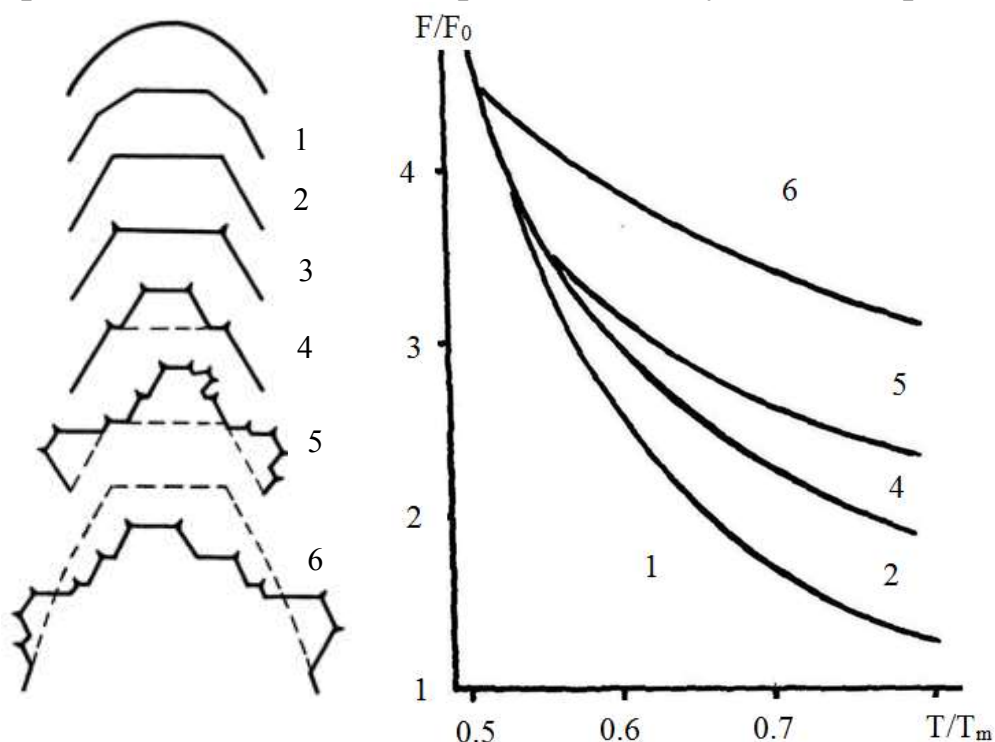


Рис. 6. Режимы термополевой обработки тугоплавких металлов

В пятой главе описаны возможные практические приложения.

Проведенное исследование термополевых формоизменений позволили опробовать новые приемы обработки острийных эмиттеров.

Для уменьшения радиуса острия непосредственно в приборе в вакууме можно использовать термополевую обработку в области режимов 4 рис.6. На вершине острия растет усеченная пирамида, длина острия увеличивается, радиус уменьшается. Если затем прогреть острие без поля, то получится острие с меньшим радиусом и бóльшим фактором поля. Нахождению режимов термополевой обработки помогает использование микроскопии высокотемпературного полевого испарения. С помощью последовательных процедур термополевой обработки и прогрева без поля удавалось увеличивать фактор поля острия формы отжига в 2 раза.

Термополевая обработка в режимах области 6 приводит к затуплению острия более интенсивному, чем при нагревании без поля. Для тугоплавких металлов предельный радиус, до которого можно затупить острие прогревом без поля, составляет $1 \div 1.5 \mu\text{m}$. Термополевая обработка позволила продвинуть этот предел до $2 \div 3 \mu\text{m}$ для W и Re, и до $3 \div 4 \mu\text{m}$ для Mo, Ta, Nb и Ir. Описанный способ является наиболее простым

методом управляемого затупления острия (кроме простого прогрева без поля), не требует никаких дополнительных приспособлений.

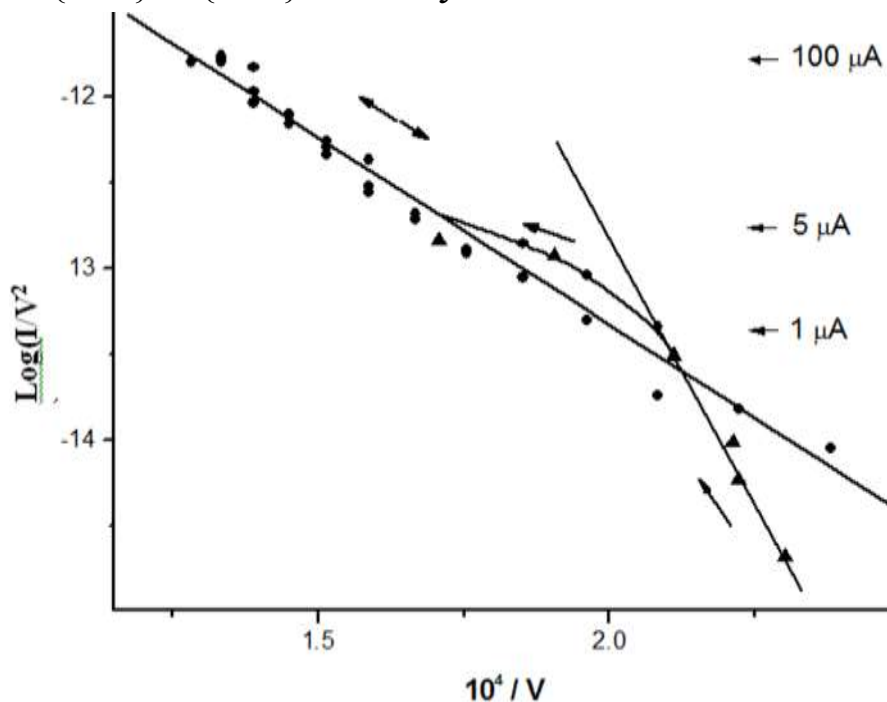
Для получения больших эмиссионных токов применяются многоострийные системы [9, 12]. В этом случае важнейшей задачей является получение одинаковых факторов поля для каждого острия. Острия необходимо нагреть до температуры, при которой происходит образование наростов. На диаграмме рис.6 точки режимов попадут на вертикальную прямую. Острия с наименьшим фактором поля попадают в область (4), их радиусы уменьшаются, острия со средним фактором поля попадают в область 5, их факторы поля изменяются мало. Острия с наибольшими факторами поля подвергаются режимам из области 6, их факторы поля уменьшаются. Таким образом, различие в факторах поля уменьшается. Описанные способы приводят к выравниванию именно факторов поля, а не радиусов острия, как это происходит, например, при прогреве многоострийного эмиттера без поля. Параллельно с нашими работами в группе Г.Н. Фурсея были получены хорошие результаты выравнивания фактора поля многоострийного катода при применении последовательно термополевой обработки и прогрева без поля. В качестве механизма интенсивного затупления и была предложена следующая схема. При термополевой обработке происходит "критическая перестройка", приводящая к разрыхлению поверхности. При последующем нагревании это приводит к усилению поверхностной диффузии и интенсивному затуплению острия [31]. Однако, наши эксперименты показали, что затупление происходит уже во время термополевой обработки за счет полевого испарения.

Перестроенное в многогранник острие является эффективным источником электронов, обладающим рядом ценных для электронно-оптических применений свойств, таких как малый размер источника электронов, удобное для фокусировки радиальное расхождение электронных траекторий, очень большая электронная яркость. Локализация эмиссии исследовалась неоднократно [9, 12], однако эксперименты проводились при сравнительно малых плотностях тока, а применявшиеся методы не позволяли изучить изменения формы острия при эмиссии. Для изучения эмиссии предельно большой плотности тока с перестроенного острия и микровыступов проведены эксперименты двух типов. В стеклянном полевом электронном микроскопе характеристики Фаулера-Нордгейма и эмиссионные изображения регистрировались при повышении (восходящая ветвь) и последующем понижении (нисходящая ветвь) напряжения [A9, A12]. Характеристики имели линейные участки

на обеих ветвях при токах $\sim 100 \mu\text{A}$. Увеличение эмиссионного тока до $\sim 1 \text{mA}$ с одного микровыступа приводило к исчезновению микровыступов и уменьшению наклона характеристик. В интервале токов $5 \div 10 \text{mA}$ увеличивались эмиссия углов и наклон характеристик. Максимальная плотность тока оценивалась как 10^{10}A/cm^2 , а максимальный ток с одного острия составлял 20mA . Отбор тока продолжался 30 секунд. Опыт пришлось прекратить из-за разогрева стекла и его вдавливания внутрь под действием атмосферного давления. Г.Н. Фурсей с сотрудниками повторили эксперименты [12, 32] в более подходящей для таких измерений металлической вакуумной установке. По расчетам авторов при 6.2mA плотность тока составляла $7.5 \times 10^{10} \text{A/cm}^2$, а эмиссионная площадь $\sim 1.8 \times 10^{-13} \text{cm}^2$. Максимальная плотность тока оценивалась как $\sim 10^{11} \text{A/cm}^2$.

Появление полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия позволило провести исследования эмиссии большой плотности тока на другом уровне [A39]. Опыты проводились в металлической установке (рис.1). После термополевой перестройки эмитировал только моноатомный угол $\langle 111 \rangle$ (рис.4). После отбора эмиссионного тока $100 \mu\text{A}$ огранка острия изменилась. На вершине угла появилась грань $\{111\}$, перпендикулярная оси угла. Ребра угла превратились в области, состоящие из плоскостей $\{112\}$ и $\{001\}$ и их ступеней.

*Рис. 7.
Характеристики
Фаулера-Нордгейма
полевой электронной
эмиссии
вольфрамового
острия с
моноатомным
трехгранным углом
 $\langle 111 \rangle$ на вершине.*



Характеристика Фаулера-Нордгейма (рис.7), снятая при первоначальном подъеме эмиссионного тока, показывает, что изменения эмиссионных характеристик начинаются при токе $\sim 100 \text{nA}$, а основные изменения в интервале токов $1 \div 5 \mu\text{A}$. При увеличении тока до $100 \mu\text{A}$ характеристики

изменялись мало. После выдержки 5 минут при токе $100\mu\text{A}$ форма острия стабилизировалась, характеристика была прямой в интервале токов $0\div 150\mu\text{A}$ при повышении напряжения и при понижении. Площадь эмиссии в интервале токов $0,1\div 1\mu\text{A}$ составляла $\sim 10^{-14}\text{cm}^2$ и изменения формы атомарно острого эмиттера начались при плотностях тока $10^7\div 10^8\text{A/cm}^2$. При повышении тока до $100\mu\text{A}$ площадь увеличилась до $\sim 10^{-13}\text{cm}^2$ и плотность тока до $\sim 10^9\text{A/cm}^2$. Выводы о локальной плотности тока сделаны на основании сравнения измеренных токов и площадей, определенных из полевых десорбционных изображений, полученных в том же эксперименте. В других случаях плотности тока определялись из оценки площадей по полевым ионным изображениям типичных микровыступов [A9], полученных в других экспериментах или по теоретическим вычислениям [12, 33].

Полученные плотности тока ($\sim 10^{10}\text{A/cm}^2$) можно сравнить с теоретическим пределом – потоком электронов в металле, пересекающем плоскость: $j_{\text{max}} = 4\pi e^2 m h^{-3} \Delta E^2 = 4.3 \cdot 10^9 \Delta E^2$ (ΔE – интервал энергий, отсчитанный вниз от уровня Ферми в eV, j_{max} – в A/cm^2) [12, 34]. Если положить ΔE равным всей ширине зоны проводимости вольфрама ($\Delta E_{\text{max}} \approx 6\text{ eV}$), то $j_{\text{max}} = 1.5 \cdot 10^{11}\text{A/cm}^2$.

Форма эмиттера при термополевой обработке была стабильной и не изменялась при нагревании в поле до $T=2600\text{ K}$. Однако при отборе электронной эмиссии происходили заметные изменения формы. Причинами могут быть ослабление поля пространственным зарядом эмитированных электронов и отличие распределения температуры по острию. В случае термополевой обработки острие нагревается теплопроводностью от основания к вершине. При эмиссии тепло распространяется в противоположном направлении от вершины острия к основанию. К движущим силам поверхностной диффузии добавляются градиент температуры и неоднородное тепловое расширение.

Влияние пространственного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию и на изменение формы эмиттера. Считается, что ограничение эмиссионного тока пространственным зарядом происходит при плотности тока $j \geq 5 \cdot 10^6 \div 10^7\text{A/cm}^2$ [34, 35], т.е. на несколько порядков ниже измеренной. Барьер для электронов образован кривой потенциальной энергии и уровнем Ферми (рис.8). Подстановка в формулу Фаулера-Нордгейма поля на поверхности эквивалентна тому, что барьер имеет вид верхней кривой, т.е. значительно больше реального барьера (средняя кривая). Это связано с принципиальной кривизной потенциальной функции электрического поля в области

пространственного заряда. Кроме того, эта кривизна (неоднородность поля) увеличивается при приближении к поверхности эмиттера и растет с увеличением плотности тока, чем случай пространственного заряда принципиально отличается от неоднородности поля, связанной с геометрией электродов. Оценки влияния пространственного заряда с учетом этой особенности [А32] показывают, что для затупленного прогрева металлического острья ($R=10^{-5}-10^{-4}$ см, $\phi=4,5$ eV) заметное влияние (изменение F на 1-10%) начинается при $j \geq 5 \cdot 10^7 \div 10^8$ А/см² и значительное влияние (~50%) при $j \geq 10^9$ А/см². Для $R=10^{-7}-10^{-6}$ см заметное влияние при $j \sim 10^9$ А/см², а значительное – при $j \geq 10^{10}$ А/см². Плотности тока, при которых пространственный заряд заметно влияет на эмиссию, практически никогда не достигаются. Отклонения от зависимости Фаулера-Нордгейма вероятно связаны с отличием формы барьера [37].

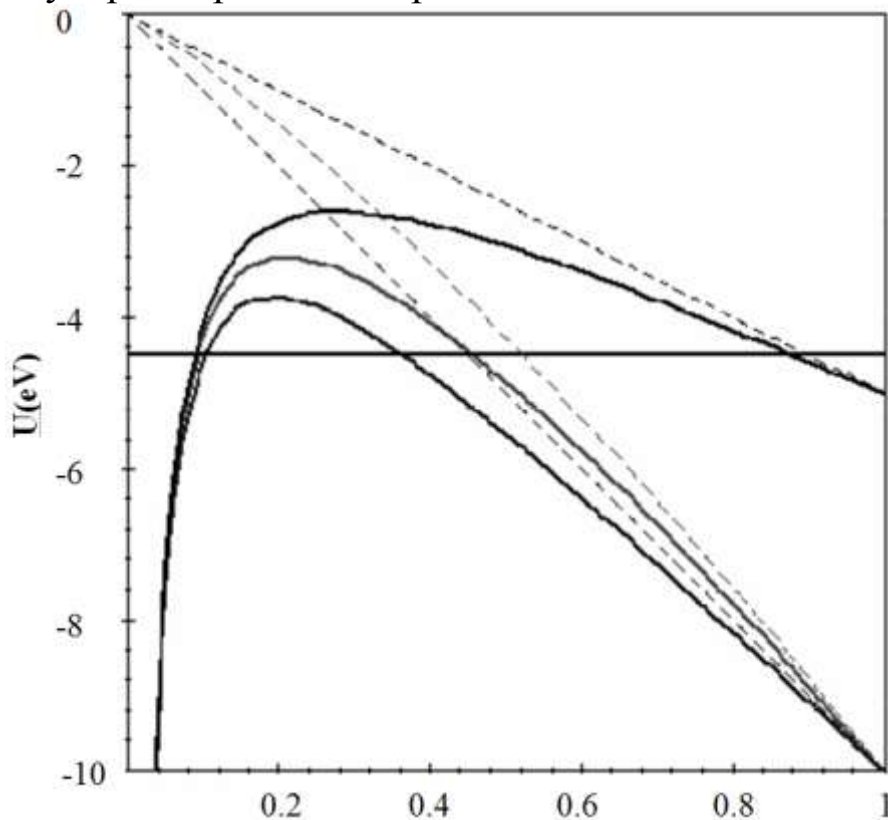


Рис.8. Зависимости электрического потенциала (пунктир) и потенциальной энергии электрона (сплошные): нижние кривые – без учета пространственного заряда, средние – с учетом, верхние – соответствует подстановке поля на поверхности в формулу Фаулера-Нордгейма

Электрическое поле пространственного заряда, оказывающее отрицательное давление пропорциональное квадрату напряженности поля на поверхности, влияет на изменение формы эмиттера. Пространственный заряд понижает давление электрического поля в большей степени, чем эмиссию электронов. В приведенном на рис.8 примере поле ослаблено в 2 раза (давление в 4), а эффективное для эмиссии поле на 25%. Понижение давления электрического поля ослабляет компенсацию затупляющего действия поверхностного натяжения, что приводит к затуплению эмитирующих участков.

Изменяется и распределение давления по поверхности. Над эмитирующими участками растягивающее давление поля уменьшается. Этот факт может служить одной из причин получения новой формы острия при эмиссии из трехгранного угла.

Эмиссия ионов. Полевая десорбция и полевое испарение ранее применялись для получения коротких ионных импульсов [1]. Обнаруженные процессы непрерывной полевой десорбции и высокотемпературного полевого испарения микровыступов могут быть использованы для получения ионных пучков в непрерывном режиме. При высокотемпературном полевым испарении приходящие с боковой поверхности острия атомы испаряются в виде ионов с вершины многогранного угла или микровыступа, образуется стационарный пучок ионов, исходящий из небольшой (размером в несколько или даже в один атом) площади и локализованный в узком, порядка одного градуса, телесном угле. При полевым испарении с большого количества микровыступов возможна эмиссия ионов с большей площади, со всей вершины острия. Максимальный ионный ток с острия составлял $\sim 10^{-12}$ А. Отбор ионного тока мог продолжаться несколько часов.

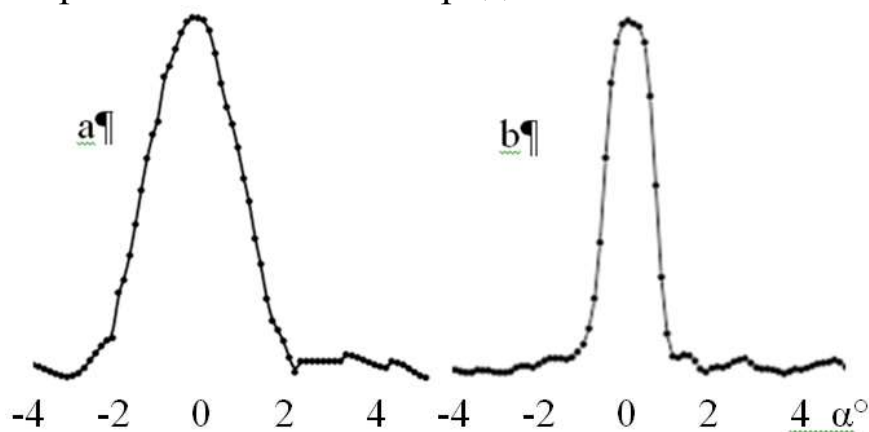


Рис9. Угловые распределение эмиссии электронов (a) и ионов Cs^+ (b) с трехгранного угла $\langle 111 \rangle$ перестроенного вольфрамового острия.

Для получений непрерывной полевой десорбции на поверхность острия наносится адсорбат. При нагревании острия в электрическом поле атомы адсорбата диффундируют по поверхности к вершине острия и десорбируются с нее в виде положительных ионов. Эмиссия ионов может идти или со всей вершины острия или с небольшого участка поверхности, например с плоскости (011) на вершине вольфрамового острия (рис. 3b). В еще большей степени эмиссионную площадь можно уменьшить термополевой обработкой острия. На рис.9b показаны угловые распределения траекторий ионов, эмитированных с моноатомного угла $\langle 111 \rangle$ вольфрамового острия. Непрерывная полевая десорбция продолжается в течение нескольких часов без дополнительного напыления адсорбата.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.

1. Впервые исследована полевая десорбция с использованием прямой регистрации десорбируемых ионов. При изучении полевой десорбции Na, K, Cs и Ba с W и Ir обнаружена немонотонная зависимость десорбирующего поля от степени покрытия с максимумом вблизи покрытия, соответствующего минимуму работы выхода. Обнаружен эффект непрерывной полевой десорбции в условиях, когда десорбция и поверхностная диффузия десорбируемого адсорбата протекают одновременно. На основе обнаруженного эффекта предложена новая методика полевой эмиссионной микроскопии – полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия.
2. Впервые зарегистрированы потоки ионов, образующиеся при высокотемпературном полевом испарении термополевых микровыступов, и создана новая методика – микроскопия высокотемпературного полевого испарения.
3. Комплексом методов, включающем полевую электронную и полевую ионную микроскопии, а также оригинальные методики полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия и микроскопии высокотемпературного полевого испарения, изучены изменения формы металлических кристаллов в форме острия при нагревании в электрическом поле. Обнаружен процесс полевого кристаллического роста, проявляющийся в образовании наростов на плотноупакованных гранях или в удлинении и обострении острия. На атомном уровне прослежены процессы образования ребер и углов при перестройке вершины острия в многогранник, продемонстрирована возможность получения многогранных углов с моноатомной вершиной. Разработана общая схема термополевых формоизменений, найдены режимы образования различных форм и созданы теоретические модели процессов.
4. Изучена полевая электронная эмиссия с перестроенного в электрическом поле острия, в том числе с моноатомного трехгранного угла. Получены рекордные локальные плотности тока (до $10^9 \div 10^{10}$ А/см²) полевой электронной эмиссии в стационарном режиме. Изучены происходящие при отборе тока изменения формы эмиттера и обнаружено появление новой формы острия, стабильной в условиях больших эмиссионных токов. Теоретическое рассмотрение влияния пространственного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию и на происходящие при эмиссии изменения формы показало, что влияние в этих случаях различается количественно.

Различие связано с тем, что на изменение формы влияет напряженность поля на поверхности, а на эмиссию – поле в промежутке, соответствующем ширине барьера. Напряженность поля пространственного заряда быстро падает с отходом от поверхности из-за уменьшения его плотности вследствие ускоренного движения электронов и расхождения траекторий. Поэтому, ослабление поля влияет на изменение формы сильнее, чем на эмиссию. Влияние пространственного заряда на эмиссию в предыдущих работах было переоценено, т.к. учитывалась напряженность поля на поверхности эмиттера. Ослабление эмиссии пространственным зарядом происходит при плотностях тока на $1\div 2$ порядка более высоких, чем полагалось ранее.

5. На основе результатов изучения термополевых формоизменений предложены новые способы обработки острийных эмиттеров, позволяющие уменьшать или интенсивно увеличивать радиус острия, а также выравнивать фактор поля многоострийного эмиттера. Предложены острийные твердотельные источники ионов металлов, использующие обнаруженные эффекты непрерывной полевой десорбции щелочных и щелочноземельных металлов и высокотемпературного полевого испарения тугоплавких металлов.

Публикации по теме диссертации

[A1] Комяк Н.И., Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Способ изготовления автоэмиссионных острийных катодов // Авторское свидетельство № 425239, 1972.

[A2] Комяк Н.И., Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Способ изготовления автоэмиссионных острийных катодов // Авторское свидетельство № 464238, 1972.

[A3] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. // Обнаружение вытягивания острий электрическим полем // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 17, в. 5. С. 247-250.

[A4] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Савченко В.П., Шредник В.Н. Способ затупления острийных катодов // Авторское свидетельство №493834, 1973.

[A5] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н., Савченко В.П. Новый способ обработки автокатодов // Аппаратура и методы рентген. анализа. 1974. В. 13. С. 256-258.

- [A6] Shrednik V.N., Pavlov V.G., Rabinovich A.A., Shaikhin B.M. Growth of tips in the directions normal to close-packed faces by heating in the presence of an electric field // *Physica Status Solidi(a)*. 1974. V. 23, № 2. P. 373-381.
- [A7] Шредник В.Н., Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шайхин Б.М. Воздействие сильного электрического поля и нагрева на металлические острия // *Известия АН СССР, сер. физич.* 1974. Т. 38, в. 2. С. 296-301.
- [A8] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Полевая эрозия Mo, Ta, Nb, Ir, Re // *ФТТ*. 1975. Т. 17, в. 5. С. 2045-2048.
- [A9] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Высокие локальные плотности тока автоэлектронной эмиссии в стационарном режиме // *ЖТФ*. 1975. Т.45, в.10. С. 2126- 2134.
- [A10] Павлов В.Г., Шайхин Б.М., Шредник В.Н. Исследование в ионном проекторе изменения формы острия при самодиффузии в сильном электрическом поле // *Труды 1 Всесоюзного совещания по автоионной микроскопии*. Харьков: ХФТИ АН СССР. 1975. С. 77-80.
- [A11] Pavlov V.G., Shrednik V.N. On field growth of refractory metals in high vacuum // *Proceedings of 7-th International symposium on discharges and electrical insulation in vacuum*. Novosibirsk. 1976. P. 209-212.
- [A12] Pavlov V.G., Shrednik V.N. One of the ways to obtain the highest possible field emission current density // *Ibid.* P. 213-216.
- [A13] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Температурная зависимость минимальной напряженности электрического поля, необходимого для образования термополевых микровыступов // *ЖТФ*. 1977. Т. 47, в. 2. С. 405-409.
- [A14] Golubev O.L., Pavlov V.G., Shrednik V.N. Field emission study of the growth of close-packed and stepped surfaces of tungsten single crystal // *J. Crystal Growth*. 1981. V.52. P. 48-52.
- [A15] Власов Ю.А., Павлов В.Г., Шредник В.Н. Высокотемпературное полевое испарение термополевых микровыступов // *Письма в ЖТФ*. 1986. Т. 12, в. 9. С. 548-552.
- [A16] Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. Многоатомные ионы цезия при полевой десорбции // *Письма в ЖТФ*. 1986. Т. 12, в. 6. С. 806-808.
- [A17] Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. Зависимость полевой десорбции цезия с вольфрама от поверхностной концентрации цезия // *ЖТФ*. 1987. Т. 57, в.11. С. 2257-2261.
- [A18] Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. Способ получения пучка ионов цезия // *Авторское свидетельство № 1412516*. 1986.

- [A19] Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. Способ получения пучка ионов цезия // Авторское свидетельство № 1485928. 1988.
- [A20] Павлов В.Г., Рабинович А.А., Шредник В.Н. Способ получения ионного пучка // Авторское свидетельство № 1529993. 1988.
- [A21] Бернацкий Д.П., Власов Ю.А., Павлов В.Г. Влияние адсорбированного бария на полевою десорбцию цезия // ЖТФ. 1988. Т. 58, в. 6. С. 2257-2261.
- [A22] Ageev V.N., Bernatskii D.P., Kuznetsov Yu.A., Pavlov V.G., Potekhina N.D., Yakshinskii B.V. Field and electron-stimulated desorption of alkaline metals from iridium and tungsten // Phys. low-dimens. Struct. 1994. №7. P.51.
- [A23] Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Study of field desorption and adatom diffusion by means of direct field desorption imaging // Proc. 9th Int. Vac. Microelectron. Conf. S.-Petersburg: Bonch-Bruевич University of Telecommunications. 1996. (ISBN 5-86072-081-5). P. 47-50.
- [A24] Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Field desorption point source of alkali and alkaline-earth metal ions // Ibid. P. 484-486.
- [A25] Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Field desorption of sodium // Phys. Low-Dimens. Struct. 1997. № 7. P. 93-97.
- [A26] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Автоколебательные эффекты при полевой десорбции щелочных металлов // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, в. 6. С. 22-26.
- [A27] Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Influence of high electric field on KAu film // Phys. Low-Dimens. Struct. 2001. V. 11-12. P. 227-231.
- [A28] Bernatskii D.P., Pavlov V.G. Method of field desorption microscopy of continuous mode // Proceed. 5-th ISTS Scientific Advisory Committee Seminar Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology. St.Petersburg, Russia. 2002. P. 330-332.
- [A29] Павлов В.Г. Полевая десорбционная микроскопия // В кн.: Автоионная и автоэлектронная микроскопии и спектроскопия: история, достижения, современное состояние, перспективы. Под ред. А.Л. Суворова. М.: "Академпринт". 2003. С. 315-319.
- [A30] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Исследование взаимодействия адсорбированных атомов золота и щелочных металлов // Там же. С. 340.
- [A31] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая десорбция пленки калий-золото на вольфраме // ФТТ. 2004. Т. 46, в. 8. С. 1494-1497.
- [A32] Павлов В.Г. Влияние объемного заряда эмитированных электронов на полевою электронную эмиссию // ЖТФ. 2004. Т. 74, в. 12, с.72-79.
- [A33] Павлов В.Г. Полевая десорбционная микроскопия термополевых формоизменений // ФТТ. 2005. Т. 47, в. 11. С. 2091-2096.

- [A34] Павлов В.Г. Изменение формы термополевых наростов на вольфрамовом острие во время роста // ФТТ. 2006. Т. 48, в. 5. С. 912-915.
- [A35] Павлов В.Г. Полевая десорбционная микроскопия трехгранного угла $\langle 111 \rangle$ перестроенного вольфрамового острия // ЖТФ. 2006. Т. 76, в. 9. С. 101-106.
- [A36]. Бернацкий Д.П., Павлов В.Г., Полевой электронный эмиттер на основе пленки химического соединения цезия с золотом // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, в. 13. С. 52-56.
- [A37] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Трансформация наноструктур на поверхности под действием электрического поля и полевой электронной эмиссии // Сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Харьков: ИПП «Контраст». 2007. С. 23-28.
- [A38] Павлов В.Г. Атомарно острый трехгранный угол $\langle 111 \rangle$ вольфрамового острия // ФТТ. 2007. Т. 49, в. 8. С. 1504-1507.
- [A39] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Изменение поверхности эмиттера при полевой электронной эмиссии большой плотности тока с трехгранного угла $\langle 111 \rangle$ перестроенного вольфрамового острия // ЖТФ. 2007. Т. 77, в. 12. С. 61-65.
- [A40] Павлов В.Г., Бернацкий Д.П. Исследование поверхности твердого тела методом полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия // Труды 1-го Международного междисциплинарного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей». Ростов-на-Дону: СКНЦ ВЦ ЮФУ АНСН. 2008. С. 239-241.
- [A41] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Структурные изменения в пленке аморфного углерода при электронной эмиссии // Там же. С. 63-64.
- [A42] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Исследование наноструктурных материалов с помощью методов полевой электронной и полевой десорбционной микроскопии. Сб. докл. Харьковской нанотехнол. ассамблеи. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. Т.1. С. 192-196.
- [A43] Бернацкий Д.П., Иванов-Омский В.И., Павлов В.Г. Полевая электронная эмиссия с аморфного углерода, покрытого цезием // Сборник трудов 6-й Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". СПб, Изд-во Политехнического университета. 2008. С. 103-104.
- [A44] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Исследование поверхности твердого тела методом полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия. Изв. РАН. Сер. физич. 2009. №5. С. 713-715.
- [A45] Бернацкий Д.П., Иванов-Омский В.И., Павлов В.Г. Особенности полевой десорбции цезия с полевого эмиттера, покрытого пленкой

аморфного углерода // Сборник трудов 7 Межд. конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники». СПб: Изд-во Политехнического ун-та. 2010. С. 151-152.

[A46] Павлов В.Г. Полевая электронная эмиссия наноструктурированных поверхностей // Узбекский физический журнал. 2010. Т. 12, № 1-2. С. 26.

[A47] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Эффект инверсии полевой электронной эмиссии вольфрама, покрытого наноструктурированным углеродом, при адсорбции атомов цезия // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, в. 14. С. 13-18.

[A48] Бернацкий Д.П., Иванов-Омский В.И., Павлов В.Г. Полевая десорбция цезия с наноструктурированной пленки аморфного углерода на полевом электронном эмиттере // Труды 2 Международного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей». Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2010. С. 37-38.

[A49] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Аномальные изменения электронной эмиссии при адсорбции щелочных металлов на углеродной пленке // Известия РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75, № 5. С. 1-3.

[A50] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая электронная микроскопия пленки графена на иридиевом электронном эмиттере // Труды. Международного симпозиума «Физика межфазных границ и фазовые переходы». Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2011. С. 43-44.

[A51] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая десорбция ионов цезия из интеркалированного графенового слоя на поверхности иридия. // Там же. С. 45-46.

[A52] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая эмиссионная микроскопия графена на иридиевом эмиттере // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. С. 35-41.

[A53] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Эмиссия ионов цезия с поверхности графена на иридии в сильном электрическом поле // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. С. 936-939.

[A54] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Импульсы ионного тока при полевой десорбции цезия с графена на иридии // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, в. 21. С. 7-12.

[A55] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая десорбция ионов цезия с аморфного углерода и графена // Сборник трудов 8 Международной конференции «Аморфные и микро-кристаллические полупроводники». СПб: Изд-во Политех. ун-та. 2012. С. 112-113.

[A56] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Нестационарные процессы полевой десорбции цезия с поверхности графена // Труды 3 международного

междисциплинарного симпозиума «Физика низкоразмерных систем и поверхностей». Ростов: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2012. С. 16-17.

[A57] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Модификация эмиссионных поверхности полевого эмиттера на основе Ir-C-Cs // Труды 3-го международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. 2013. С. 46-48.

[A58] Бернацкий Д.П., Павлов В.Г. Полевая электронная эмиссия и полевая десорбция цезия с графена // ЖТФ. 2013. Т.83, в.6. С. 33-37.

Список цитируемой в автореферате литературы

1. Мюллер Э.В., Цонг Т.Т. Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение. М.: "Наука", 1980. 224 с.
2. Гаврилюк В.М., Наумовец А.Г. // ФТТ. 1963. Т. 5. № 10. С. 2792-2798.
3. Агеев В.Н., Бернацкий Д.П., Мечетин А.М., Павлов В.Г. // ЖТФ. 1987. Т.57. С.1121.
4. Бернацкий Д.П. // Диссертация на соискание уч. степени кандидата физ.-мат. наук. ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. Ленинград. 1988.
5. Гаврилюк В.М., Медведев В.К. // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 172-177.
6. Bernatskii D.P., Chernyshev A.V., Ivanov-Omskii V.I. Appl.Surf.Sci. // 2003. V. 215. P. 222.
7. Medvedev V.K., Suchorski Yu., Block J.H // Ultramicroscopy. 1994. V. 53. P. 27-35.
8. Сокольская И.Л. // Поверхностная диффузия и растекание. Под ред. Гегузина Я.Е. М.: «Наука». 1969. С. 108-148.
9. Ненакаливаемые катоды. Под ред. М.И.Елинсона. М.: «Сов.Радио», 1974.
10. Шредник В.Н. // Рост кристаллов. Т. 13. М.: «Наука». 1980. С. 68-79.
11. Fujita S., Shimoyama H. // Phys. Rev. B. 2007. V. 75. P. 235431.
12. Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия. СПб: Из-во «Лань». 2012. 320 с.
13. Swanson L.W., Crouser L.C. // J.Appl.Phys. 1969. V.40. P. 4741-1249.
14. Crewe. V., Eggenberger D.N., Wall J., Welter L.M. // Rev.Sci.Instrum. 1968. V. 39. P. 576.
15. Crewe A.V., Wall J., Langmore J. // Science. 1970. V. 168. P. 1338-1340.
16. Williams D.B., Carter C.B. Transmission electron microscopy. Springer. 2012. 760 p.
17. Scanning electron microscopy. Ed. Kazmiruk V. InTech. 2012. 830 p.
18. Drechsler M. // Zs. f. Elektrochemie. 1957. Bd. 61, S 48-55.

19. Nakagawa T., Rokuta E., Murata H., Shimoyama H., Oshima C. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2013. V. 31. P. 02B105.
20. Hagedorn T., Ouali M.E., Paul W., Oliver D., Miyahara Y., Grütter P. // *Rev. Sci. Instrum.* 2011. V. 82. P. 113903.
21. Голубев О.Л. // *ЖТФ.* 2011. Т. 81, в. 6. С. 113-119,
22. Фурсей Г.Н., Мовчан Б.Н., Шваркунов В.А. // *Письма в ЖТФ.* 1990. Т.16. С.42-46.
23. Птицын В.Э., Фурсей Г.Н. // *Известия АН СССР (серия физическая).* 1988. Т. 52. С. 1513.
24. Френкель Я.И. // *ЖЭТФ.* 1946. Т. 16. С. 39.
25. Herring C. // *Structure and properties of solid surfaces.* Chicago: Univ. Press. 1953. P. 5-81.
26. Barbour J.P., Charbonnier F.M., Dolan W.W., Dyke W.P., Martin E.E., Trolan J.K. // *Phys. Rev.* 1960. V. 117, № 6. P. 1452-1459.
27. Шредник В.Н., Глазанов Д.В., Конторович Е.Л. // *ЖТФ.* 2003. Т. 73, в.9. С. 120-125.
28. Власов Ю.А., О.Л. Голубев, Шредник В.Н. // *Известия АН СССР. Серия физическая* 1988. Т. 52, № 6. С. 1538-1543.
29. Голубев О.Л., Шредник В.Н. // *ЖТФ.* 2005. Т. 75, в. 9. С. 111-116.
30. Шредник В.Н. // *Микроэлектроника.* 1997. Т. 26, № 2. С. 97-101.
31. Вентова И.Д., Фурсей Г.Н // *ЖТФ.* 1977. Т. 47. № 4. С. 857-859.
32. Fursey G.N., Baskin L.M., Glasanov D.V. Yevgen'ev A.O., Kotcheryzhenkov A.V., Polezhaev S.A. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1998. V. 16. P. 232-237.
33. Fursey G.N., Glazanov D.V. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1998. V. 16. P. 910-915.
34. Forbes R.G. // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2010. V. 28, Iss. 6. P. 1326.
35. Батраков А.В., Пегель И.В., Проскуровский Д.И // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. С. 78.
36. Forbes R.G. // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. P. 084303.
37. Lewis C.D. // *Phys. Rev.* 1956. V. 101. № 6. P. 1694-1698.