

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Российской академии наук

Ф И А Н

119991, Москва, В-333

Ленинский проспект, 53, ФИАН

Телефоны: (499) 135 1429

(499) 135 4264

Телефакс: (499) 135 7880


<http://www.lebedev.ru>

postmaster@lebedev.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физического
института им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук,
академик РАН



 / Г.А. Месяц /
« 12 » марта 2014 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертацию Павлова Виктора Георгиевича “Поверхностная диффузия, десорбция и кристаллический рост в электрическом поле”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Эмиссия электронов и ионов в электрическом поле широко используются в научных исследованиях и практических приложениях. Ее широкое практическое применение обусловлено ее уникальными свойствами: эмиссия электронов и ионов не требует дополнительных энергетических затрат, она практически безынерционна, возможно достижение сверхвысоких плотностей эмиссионного тока, малая площадь эмиссии. В последнее время интерес к полевым эмиттерам еще более возрос в связи с бурным развитием вакуумной микроэлектроники, разработкой и созданием приборов терагерцового диапазона частот, электронной микроскопии сверхвысокого разрешения. Наконец, полевая электронная эмиссия с высокой плотностью тока приводит к инициированию взрывной электронной эмиссии, используемой для получения сильноточечных электронных пучков.

Форма и рельеф поверхности эмиттера являются основными факторами, определяющими работу полевых эмиттеров. В связи с этим, исследуемые в работе процессы поверхностной диффузии, полевой десорбции и изменения формы эмиттеров в электрическом поле могут быть использованы для формирования эмиссионной поверхности полевых эмиттеров и получения ионных потоков. Поэтому тема диссертационной работы В.Г. Павлова, направленной на уточнение физической картины процессов на поверхности металла в сильном электрическом поле и на создание научной

основы технологии изготовления полевых электронных и ионных эмиттеров, является, несомненно, **актуальной**.

Диссертация В.Г. Павлова состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения и списка цитированной литературы. В первой главе рассмотрено состояние исследований в научной области, в которой выполнена работа, обоснована актуальность темы диссертации, определены основные цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные защищаемые положения, приводятся данные по апробации работы.

При работе использованы известные экспериментальные методы: полевая электронная микроскопия и полевая ионная микроскопия, а также предложены и использованы новые: полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия и микроскопия высокотемпературного полевого испарения. Исследование полевой десорбции впервые проведено методом прямой регистрации десорбируемых ионов. В результате обнаружена более сложная, чем наблюдалась ранее, зависимость десорбирующего поля от степени покрытия и найдена возможность стационарной эмиссии ионов при полевой десорбции атомов щелочных и щёлочноземельных металлов. На этой основе предложен новый экспериментальный метод: полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия, а также разработан новый тип ионных источников.

Изменения формы металлических кристаллов в форме острия при их нагревании в сильном электрическом поле (термополевые формоизменения) исследованы комплексом методов, включающем полевую электронную и ионную микроскопии, полевую десорбционную микроскопию непрерывного действия и микроскопию высокотемпературного полевого испарения. Обнаружен процесс полевого кристаллического роста, проявляющийся в образовании наростов на плотноупакованных гранях или в удлинении острия. Впервые экспериментально зарегистрировано полевое испарение ионов при термополевых формоизменениях. Термополевая перестройка острия в многогранник изучена на атомном уровне, продемонстрирована возможность получения многогранных углов с моноатомной вершиной. Разработана общая схема термополевых формоизменений, найдены режимы образования различных форм и созданы теоретические модели процессов.

Последняя глава диссертации посвящена изучению возможных практических приложений. Исследована полевая электронная эмиссия с перестроенного в многогранник 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 и изучены происходящие при отборе тока изменения формы эмиттера. Предложены и

испытаны новые способы обработки эмиттеров, позволяющие уменьшать или увеличивать радиус острия, выравнивать острия многоострийного эмиттера по фактору поля. Изучены точечные твердотельные источники ионов металлов, использующие обнаруженные эффекты непрерывной полевой десорбции щелочных и щелочноземельных металлов и высокотемпературного полевого испарения тугоплавких металлов.

Научная новизна работы заключается в получении новых сведений о процессах на поверхности металла в сильном электрическом поле и о максимально возможных плотностях тока полевой электронной эмиссии, в обнаружении новых эффектов, в построении общей схемы термополевых формоизменений и нахождении режимов реализации различных типов формоизменений.

Достоверность и надежность результатов обеспечена использованием апробированных методов исследования, сравнением полученных экспериментальных результатов с теоретическими моделями и с результатами, опубликованными другими авторами, широкой апробацией на международных и российских конференциях, семинарах и в научной печати.

Полученные результаты имеют **практическую значимость**. Полученные автором данные о термополевых формоизменениях могут быть положены в основу технологии управляемого изменения формы полевых эмиттеров. Обнаруженные эффекты непрерывной полевой десорбции и высокотемпературного полевого испарения делают возможным создание ионных источников нового типа с уникальными свойствами. Созданные новые экспериментальные методы существенно расширяют возможности полевой эмиссионной микроскопии. Исследование полевой электронной эмиссии при рекордно высокой плотности тока показывает возможность получения электронных пучков со сверхвысокими плотностями тока.

Результаты работы можно рекомендовать к использованию в ИРЭ РАН (Москва), ФТИ РАН (Санкт-Петербург), СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича (Санкт-Петербург), ИСЭ СО РАН (Томск), ИАиП РАН (Санкт-Петербург), СПбГПУ (Санкт-Петербург), ИЭФ УрО РАН (Свердловск), ФИАН (Москва), ИТЭФ (Москва), ИОФ РАН (Москва), МФТИ (Москва), ЗАО «НТ-МДТ» (Зеленоград), ООО ОПТЭК (Москва).

К **замечаниям** можно отнести следующее. В главе 5 рассматривается вопрос ограничения предельной плотности эмиссионного тока объемным зарядом, приводятся соответствующие расчеты электрических полей и эмиссионных токов. Следует отметить, что в настоящее время данный вопрос широко исследуется с помощью детального численного моделирования, которое позволяет установить самосогласованную картину эмиссионных процессов высокой интенсивности, включающую конфигурацию

электрических полей в геометрии микроострийных катодов, а также динамику интенсивных пучков эмитированных электронов в этих полях. В этой связи целесообразно провести сравнение полученных автором результатов по ограничению предельной плотности автоэмиссионного тока с современными данными численного моделирования. Разумеется, данное замечание не имеет принципиального характера, и не умаляет высокого уровня работы и полученных результатов.

Диссертация В.Г. Павлова является законченным научным трудом. Полученные автором диссертации результаты имеют существенное значение для развития эмиссионной электроники. Автореферат и публикации полностью и правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертация соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор по совокупности выполненных исследований и полученных результатов заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – физическая электроника.

Отзыв подготовлен на основе изучения диссертации и автореферата В.Г. Павлова, обсужден и одобрен на научном семинаре Отдела физической электроники ФИАН, протокол № 02/14 от 12.03.2014.

Зам. зав. Отделом физической электроники ФИАН

д.ф.-м.н.



С.А. Баренгольц