

ОТЗЫВ

ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА, доктора физико-математических наук, профессора Галль Лидии Николаевны, 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

Сведения об атомных процессах на поверхности металла, протекающих в условиях воздействия сильных электрических полей и, в особенности, при одновременном воздействии таких полей и высокой температуры, относятся к классической области физической электроники. Но они по-прежнему очень важны как в научном плане, т.к. позволяют изучать атомные и электронные процессы с максимальным достигаемым на сегодня пространственным разрешением, так и в плане практическом, т.к. позволяют создавать точечные электронные и ионные источники с предельной яркостью, находящие разнообразные применения в современной науке и высоких технологиях нано- и биосистем.

Диссертационная работа В.Г.Павлова посвящена экспериментальному изучению атомных процессов, протекающих на поверхности металлических и пленочных эмиттеров, помещенных в сильное электрическое поле. Как сами результаты, полученные в сверхвысоком вакууме на атомно-чистых поверхности, так и глубокое научное обсуждение изучавшихся вопросов, а также физические модели протекающих на поверхности атомных и электронных процессов представляют собой важный вклад в физическую электронику. Актуальность выполненной работы несомненна и определяется её направленностью, в первую очередь, на фундаментальное изучение всей совокупности физико-химических процессов, протекающих на поверхности твердого тела под действием сильных электрических полей и высоких температур. Однако не меньшее значение имеют и практические стороны работы, позволившие автору выдвинуть целый ряд новаторских решений, важных для научного приборостроения и вакуумной микроэлектроники.

Диссертация В.Г.Павлова состоит из введения, четырех глав, посвященных описанию полученных результатов, общих выводов, заключения и списка цитируемой литературы. Во введении (оно обозначено в диссертации пунктом 1) обоснована актуальность проведенных в работе исследований, определяется ее цель, формулируются основные задачи диссертационной работы. В нем также обосновывается научная и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту, и приводятся данные по апробации результатов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, использованных в работе. Автор подробно проанализировал состояние близких по направлению работ, имеющих место в мировой практике, провел критический анализ используемых теоретических представлений и их практического использования. На основании проведенного рассмотрения автором сформулированы требования к экспериментальным методикам и установкам, необходимым для проведения исследований термополевых процессов на поверхности. В этой главе также подробно рассмотрены общие принципы построения и конструктивные особенности экспериментальных установок, использованных в работе, и предназначенных как для визуального наблюдения структуры поверхности с увеличениями в $10^5 - 10^7$ раз, так и для масс-спектрометрического анализа продуктов термополевой десорбции методом широкоугольного времяпролетного зонда. Приведены данные, позволяющие оценить физические пределы, определяющие как пространственное разрешение электронного и ионного эмиссионных микроскопов, так и разрешение времяпролетного зонда по массе. Необходимо отметить, что практические параметры экспериментальных установок, особенно в отношении пространственного разрешения, были близки к теоретическому пределу.

Особое внимание автор уделил технике создания металлических острий-эмиттеров, которая является ключевым вопросом термополевых исследований. Эта техника распространена автором на создания острий из целого ряда тугоплавких металлов, а не только из вольфрама, как это наиболее широко распространено, и доведена до уровня воспроизводимой технологии, позволяющей, при необходимости, создавать большое число одинаковых эмиттеров. Это существенно повысило достоверность и доказательность проведенных и представленных в диссертации работ.

Третья глава посвящена рассмотрению новой, разработанной и внедренной автором методики: полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия.

Она основана на результатах изучения полевой десорбции щелочных и щелочноземельных металлов. Полевая десорбция щелочных и щелочноземельных металлов рассмотрена автором с новаторских позиций, которые позволили преодолеть существовавшие ранее ограничения и измерить полностью зависимость работы выхода поверхности от концентрации нанесенного электронно донорного вещества.

В этой же главе рассмотрена полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия, основанная на десорбции электроположительных атомов, непрерывно подходящих к острию в результате поверхностной диффузии. Этот метод важен не только сам по себе, но и потенциально, как эффективная методика исследования поверхности твердого тела.

Четвертая глава занимает основную часть диссертации и посвящена термополевым изменениям формы острия, протекающим в условиях одновременного действия поверхностной самодиффузии и полевого испарения. В ней детально рассмотрены:

1. методика исследования термополевых формоизменений, включая комплекс созданных автором методических приемов и процедуру проведения эксперимента;
2. перестройка скругленной вершины острия в многогранник и полный комплекс атомных процессов, сопровождающих это явление;
3. образование ступеней и термополевых наростов, а также их роль в формировании полевых эмиссионных картин в электронах и ионах;
4. образование микровыступов, являющихся очень важным фактором перестройки острия под действием термополевого воздействия;
5. механизмы изменения радиуса острия при термополевой обработке;
6. влияние полевого испарения на полевой кристаллический рост и зависимость формоизменений от режимов термополевой обработки острия.

Особое значение имеет формулировка общей схемы термополевых формоизменений, которая является, безусловно, основой для потенциальной технологической карты управления свойствами эмиттеров методом термополевого испарения. Эти данные подтверждены обширным экспериментальным материалом, охватывающим процессы на поверхности молибденовых, танталовых, иридиевых и рениевых острий.

В пятой главе рассмотрен ряд практических приложений развитых выше научных результатов. Наиболее важными из них являются, во-первых, управление формой остриевых эмиттеров: затупление или заострение острия, которые могут

проводиться оператором непосредственно в высоком вакууме прибора и доведены до уровня лабораторной технологии; и во-вторых, способ формирования острия, который может использоваться как зонд сканирующего туннельного микроскопа. Последнее открывает путь к существенному повышению воспроизводимости измерений, проводимых с помощью туннельного микроскопа, которые пока еще остаются на грани между наукой и искусством.

Особый научный интерес представляет раздел, посвященный теоретическому рассмотрению влияния пространственного заряда эмитированных электронов на полевою электронную эмиссию и на изменение формы эмиттера. Автором показано, что общепринятые представления о роли объемного заряда существенно завышены, что открыло возможность получать рекордные, близкие к теоретически предельным плотности тока.

Итоги работы подведены В.Г.Павловым в коротко и четко сформулированных выводах диссертации.

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена использованием апробированных экспериментальных методов исследования, сравнением полученных результатов с результатами, опубликованными другими авторами, с выполненными расчетами и оценками, практическим использованием полученных результатов в разработке ЭОПов нового поколения, широкой апробацией проведенных расчетов и результатов моделирования на международных и российских конференциях (более 40 конференций), семинарах и в научной печати.

Научная новизна работы заключается в следующих основных результатах:

1. Экспериментально обнаружены и изучены новые эффекты: полевой кристаллический рост на плотноупакованных гранях кристалла, включая образование на них термополевых наростов (макронаростов); высокотемпературное полевое испарение с микровыступов и углов перестроенного острия. Создана обладающая предсказательной силой физическая модель термополевых формоизменений металлического кристалла, включающая как известные типы формоизменений, так и новые, ранее не наблюдавшиеся.
2. Разработана и практически реализована методика визуализации атомных процессов на поверхности, протекающих непосредственно во время термополевых формоизменений.
3. Создана принципиально новая полевая методика изучения десорбции щелочных и щелочноземельных металлов. Методика позволила преодолеть ограничения предыдущих исследований и открыла возможность наблюдать сам

процесс десорбции указанных частиц. В результате был впервые обнаружен немонотонный характер зависимости десорбирующего поля от степени покрытия поверхности адсорбатом, что позволило согласовать экспериментальные данные с известной ранее теорией полевой десорбции в форме испарения иона через барьер Шоттки.

4. Впервые показана возможность и выявлены режимы существования непрерывной полевой десорбции, основанной на том, что адсорбат, удаляемый при эмиссии ионов, непрерывно возобновляется в зоне эмиссии за счет поверхностной диффузии. На его основе предложен новый вид микроскопии – полевая десорбционная микроскопия непрерывного действия, позволяющая изучать процессы не только в области наибольшей напряженности поля, но и практически на всей поверхности образца.

5. Впервые в стационарном режиме зарегистрирована полевая электронная эмиссия с плотностью тока, превышающей 10^9 А/см². Рассмотрено влияние объемного заряда эмитированных электронов на полевую электронную эмиссию и показано, что общепринятые оценки этого процесса носят существенно завышенный характер.

Созданные В.Г.Павловым представления выходят за рамки чисто экспериментального изучения процессов на металлических остриях и могут быть с полным правом отнесены к фундаментальным работам в области физической электроники, атомной физики и физики поверхности. Все положения, вынесенные на защиту, достаточно глубоко и аргументированно обоснованы.

Практическая значимость основных полученных результатов работы состоит в том что:

1. Разработаны и предложены две новые экспериментальные методики изучения поверхности, названные автором «полевой десорбционной микроскопией непрерывного действия» и «микроскопией высокотемпературного полевого испарения», которые позволяют проводить непрерывный мониторинг процессов на поверхности твердых тел в условиях термополевого воздействия

2. Разработана воспроизводимая лабораторная технология активного управления формой металлических острий – электронных и ионных эмиттеров, в частности, их заострения и затупления непосредственно в сверхвысоком вакууме, без вскрытия прибора на атмосферу, за счет комбинации контролируемого нагрева и приложения внешнего поля. Технология допускает возможность восстановления формы острия после его разрушения.

3. Получены рекордно высокие плотности тока полевой электронной эмиссии, практически достигающие теоретического предела, в том числе получен ток, протекающий через единственный атом эмиттера специальной формы.

4. Созданы источники ионов щелочных металлов нового типа, основанные на их непрерывной полевой десорбции, которые прошли лабораторные испытания.

Согласно отмеченным фактам результаты диссертационной работы **можно рекомендовать к использованию** во ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург), ИАП РАН (Санкт-Петербург), ВНИИЦ “Курчатовский институт” (Москва), ФГУП ЭЗАН (Черноголовка Московской области), в процессе преподавания спецкурсов по физической электронике, нанотехнологиям, физике поверхности, масс-спектрометрии и оптике заряженных частиц.

Необходимо отметить и ряд замечаний по диссертации:

1. Представляется, что использованное диссертантом неклассическое построение работы, в котором обзор литературных данных не вынесен в отдельную главу, но распределен по оригинальным главам, не совсем оправдан. Такое построение диссертационной работы не создает у читателя ясного представления об уровне и характере работы в данном направлении, проведенных и проводимых в мире, и тем самым затрудняет объективное определение истинного (и достаточно высокого!) вклада автора в создание современных представлений о термополевых процессах на поверхности.

2. Использованный в работе времяпролетный масс-анализатор обладал очень низким разрешением по массе за счет широкого угла сбора ионов. Представляется, что автор использовал далеко не все возможности времяпролетной масс-спектрометрии с полевым источником, и представленные в диссертации результаты существенно бы выиграли в случае повышения разрешающей силы масс-анализатора.

Отмеченные замечания не снижают ценности и научной значимости полученных результатов. Диссертация В.Г.Павлова является завершенным научным трудом, в котором обобщен опыт длительной, более чем 40-летней работы автора по экспериментальному и теоретическому изучению термополевых процессов на поверхности твердых тел и путей их практического использования. В диссертации созданы новаторские научные представления, описывающие термополевые изменения формы острий-эмиттеров, предложены конкретные технические решения и лабораторные технологии, позволяющие достигать рекордных яркостей электронных источников и управлять их характеристиками без разгерметизации

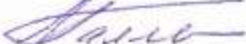
прибора и вскрытия его на атмосферу. В диссертации обосновывается и формулируется новое научное направление – термополевое сверхвысоковакуумное управление формой острия, выступающего как ионный или электронный эмиттер. Автореферат и приведенные публикации полностью и правильно отражают основное содержание 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, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04. – Физическая электроника.

Зав. лабораторией экологической масс-спектрометрии

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института Аналитического приборостроения РАН

доктор физико-математических наук, профессор  Л.Н.Галль

почтовый адрес: 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., д.26.

Тел: 812-251-71-10

e-mail: lngall@narod.ru

Подпись руки Л.Н.Галль удостоверяю

Ученый секретарь ИАП РАН, к.ф.-м.н.



А.П.Щербаков

20.03. 2014 г.