

Официальный оппонент  
проф. Фурсей Георгий Николаевич.  
Санкт-Петербургский  
государственный университет  
телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
адрес: пр. Большевиков д.22, корп.1,  
Санкт-Петербург, 193232  
E-mail: g.fursey@gmail.com

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д 002.005.03  
при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки «Физико-  
технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук»,  
по адресу: Политехническая ул., д. 26,  
Санкт-Петербург, 194021

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Виктора Георгиевича Павлова «Поверхностная диффузия, десорбция и кристаллический рост в электрическом поле», представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Диссертационная работа Павлова В. Г. посвящена исследованию фундаментальных процессов на поверхности твёрдого тела в сверхсильном электрическом поле  $10^{10}$ - $10^{12}$  В/м. В этих полях на поверхности металла имеет место ряд пограничных процессов, связанных с переносом вещества, адсорбцией, десорбцией, ионизацией, кардинальным образом изменяющих состояние поверхности. К этим явлениям относятся - поверхностная самодиффузия собственных атомов, поверхностная миграция чужеродных атомов, полевая десорбция, испарение полем, полевая ионизация и другие. Исследование этих процессов чрезвычайно актуально, так как они определяют устойчивость поверхности в сильном электрическом поле, существенно влияют на стабильность

процесса автоэлектронной и автоионной эмиссии, а также на инициирование таких процессов как вакуумный пробой и вакуумная дуга.

Понимание этих явлений абсолютно необходимо для управляемого формирования на поверхности наноструктур в задачах вакуумной наноэлектроники, для понимания условий стабильного функционирования систем вакуумной наноэлектроники. Эти процессы и явления лежат в основе технологии создания автоэмиссионных катодов, автоионных эмиттеров и оказываются важными в ряде других смежных областей. В частности, поведение поверхности в сверхсильных электрических полях, определяет работу сильноточных устройств, основывающихся на явлении взрывной электронной эмиссии и т.д.

Чрезвычайно важным и актуальным аспектом в диссертации является разработка новых направлений полевой эмиссионной (электронной, ионной и десорбционной) микроскопии. Работа принципиально является междисциплинарной – в этом её сложность и в этом же её уникальные возможности. Диссертантом рассмотрен ряд конкретных задач в этой области. В ряде случаев рассматриваемые процессы тесно взаимосвязаны, например, такие как самодиффузия, локальный рост нанокристаллов на поверхности, испарение полем и полевая ионизация.

*Диссертационная работа В.Г. Павлова несомненно актуальна.*

Диссертационное исследование включает два главных направления развития экспериментальных методик.

1) Развитие автоэмиссионной микроскопии в приложении к изучению роста и формирования нанокристаллов на поверхности металла и процесса полевого испарения.

2) Развитие автоионной микроскопии для исследования этих процессов на атомарном уровне и создание принципиально нового метода – полевой десорбционной микроскопии непрерывного действия, реализованного автором практически впервые.

Для решения поставленных задач, совершенно обосновано, автором выбрано два основных типа объектов.

1) Тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал, ниобий, иридий, молибден, рений), являющиеся классическими объектами для автоэмиссионной и автоионной микроскопии, позволяющие экспериментировать в сверхвысоком вакууме с атомарно чистой поверхностью и обладающие высоким потенциалом ионизации.

2) Адсорбционные слои щелочных и щелочноземельных металлов, обладающих низким потенциалом ионизации.

**В работе обнаружены новые эффекты и процессы:**

1) Явление непрерывной полевой десорбции, на основе которого разработан новый метод непрерывной десорбционной микроскопии.

2) Обнаружен автоэпитаксиальный рост нанокристаллов на плотно упакованных гранях W, Ta, Mo, Re, Nb, Ir. Установление закономерностей этого роста позволило создать прецизионную технологию формирования автоэлектронных эмиттеров заданной конфигурации.

3) Впервые были достигнуты рекордные, близкие к теоретическому пределу плотности тока автоэлектронной эмиссии. Работы диссертанта в области исследований предельных плотностей тока с полным основанием можно отнести к пионерским. Исследуя автоэлектронную эмиссию из кристаллических нановыступов, сформированных на поверхности в процессе термополевой обработки, ему впервые удалось показать возможность получения экстремально высоких плотностей тока автоэлектронной эмиссии вплоть до  $10^{10}$  А/см<sup>2</sup>.

Несомненно, очень важным результатом исследования является то, что автору удалось построить общую картину развития термополевых процессов и дать экспериментальное и теоретическое обоснование этой картины.

**К конкретным успехам рецензируемой работы можно отнести также следующее:**

1) Оригинальность экспериментальных подходов.

2) Высокую достоверность результатов, обусловленную непосредственной визуализацией процессов на поверхности с нанометровым и атомарным разрешением.

3) Реализацию новой методики полевой десорбции непрерывного действия.

4) Элегантный подход – нанометровый, атомарный уровень микроскопии и нанотехнология манипулирования исследуемым объектом (практически *in situ*).

5) Наглядность и красота представления эксперимента.

6) Добросовестный и тщательный анализ литературы и четкая ссылаемость на предшественников и смежные работы.

**Еще раз подчеркнем наиболее важные новые закономерности, установленные в диссертации:**

1) Прямыми экспериментами установлен факт формирования субнаноразмерных микровыступов на поверхности острейного кристалла, образующихся при его нагреве в сильном электрическом поле. Визуализация процесса образования таких нановыступов оказалась возможной благодаря реализации новых подходов к автоэмиссионной, автоионной и десорбционной микроскопии.

На основании установленных закономерностей удалось создать прецизионную технологию формирования: затупления, заострения и выравнивания автоэлектронных эмиттеров.

2) Прямыми экспериментами установлен эпитаксиальный рост нанокристаллов на плотноупакованных гранях поверхностей металла при нагреве в сильном электрическом поле.

3) Обнаружены атомно-острые углы и выступы, образующиеся на поверхности нанокристалла в сильном электрическом поле.

4) Установлена интенсивная ионная эмиссия щелочных и щелочноземельных металлов. Предложен новый эффективный источник ионов для ряда задач наноэлектроники.

Резюмируя вышесказанное еще раз, **остановимся на успехах настоящего диссертационного исследования.**

Существенным успехом настоящей диссертации является четкое и последовательное изложение механизмов формоизменения автоэлектронного эмиттера в сильном электрическом поле.

Ряд последовательных и четких экспериментов позволил надежно выделить стадии процесса и описать механизмы формообразования на отдельных стадиях процесса.

На рис 50-51 в диссертации в очень наглядной форме приведены количественные данные, позволяющие надежно контролировать различные этапы формоизменения автоэлектронного эмиттера.

Этот цикл исследований позволил выработать и экспериментально обосновать ряд технологических приемов создания автоэлектронных эмиттеров для ряда важных прикладных задач:

а) Разработаны принципы формирования атомарно острых выступов – эмиттеров. Такого рода эмиттеры востребованы в просвечивающей и растровой электронной микроскопии сверхвысокого разрешения, в электронной голографии и туннельной микроскопии.

б) Предложен новый метод выравнивания по полю элементов многоэмиттерных матриц. Эта технология имеет очень важное значение для создания эффективных систем вакуумной нанoeлектроники, а также для формирования сильноточных автоэмиссионных катодов.

Заявленные идеи закреплены в целом ряде авторских свидетельств, зарегистрированным Государственным комитетом по изобретениям и открытиям.

**К небольшим недостаткам, не влияющих на общую положительную оценку диссертационной работы, можно отнести следующие:**

1) Интерпретационная часть диссертационного исследования разнесена по отдельным главам, последнее затрудняет получение целостного восприятия о значимости этой, безусловно, высококлассной работы. Кроме этого, тонкие и очень интересные вещи теряются в общем объеме материала и поэтому с трудом воспринимаются их взаимосвязанность и дополнительность.

2) Вызывает некоторое сожаление отсутствия сопоставления результатов формообразования микровыступов в сильном электрическом поле с данными электронно-микроскопических исследований высокого разрешения.

3) В целом работа написана хорошим языком, прекрасно иллюстрирована. Некоторые небольшие замечания, могут быть высказаны относительно небольшого числа описок и не совсем удачных выражений.

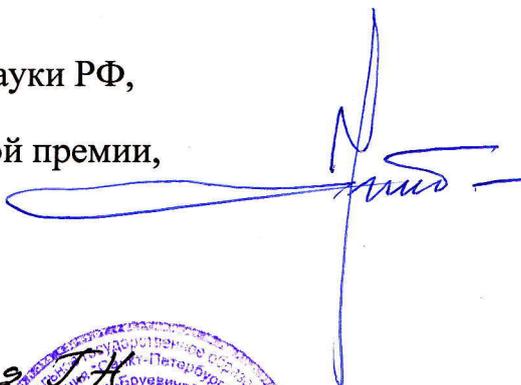
## Заключение

Резюмируя все вышесказанное, считаю, что *диссертационная работа Павлова Виктора Георгиевича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторской диссертации.* Она является первоклассным, элегантным исследованием, всесторонне охватывающим исследуемую область. *Актуальность, новизна и достоверность результатов не вызывает сомнения.*

Работы Павлова Виктора Георгиевича широко известны в России и за рубежом. Они неоднократно представлялись на Всероссийских и Международных конференциях и опубликованы в престижных рецензируемых отечественных и зарубежных журналах.

*Считаю, что диссертант безусловно заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.*

Доктор физ.-мат. наук,  
заслуженные деятель науки РФ,  
лауреат государственной премии,  
профессор



Фурсей Г.Н.

Подпись

*Фурсей Г.Н.*  
ЗАВЕРЯЮ

Начальник административно-кадрового  
управления СПбГУ

*А.И. Зверев*  
"21" марта 2014 г.

