

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук Клеща Виктора Ивановича  
на тему: «Эмиссия электронов из углеродных наноструктур»  
по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния**

Диссертационная работа Клеща В.И. посвящена исследованию закономерностей автоэлектронной эмиссии, фотоиндуцированных эффектов и некоторых сопутствующих явлений, наблюдаемых для холодных катодов на основе углеродных материалов и наноструктур. Актуальность тематики работы не вызывает сомнений и определяется как значительным фундаментальным научным интересом к эмиссии электронов из углеродных наноструктур, так и высокой перспективностью практического применения холодных катодов на основе углеродных материалов в различных электровакуумных приборах. Фундаментальный интерес продиктован прежде всего наличием отличительных особенностей в механизме автоэлектронной эмиссии, которые наблюдаются для углеродных материалов и связаны с их уникальными структурными и электронными свойствами. С практической точки зрения автоэлектронные эмиттеры имеют ряд неоспоримых преимуществ по сравнению с другими источниками свободных электронов, и решение задач, связанных с преодолением технических и технологических проблем их внедрения в практику, остается весьма актуальным в настоящее время. При этом наблюдается активное развитие как традиционных подходов к созданию холодных катодов, так и новых направлений, связанных с получением новых материалов и использованием достижений нанотехнологий.

Диссертационное исследование изложено на 323 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа хорошо структурирована, аккуратно оформлена, написана хорошим литературным языком и практически не содержит опечаток. Во введении к работе обоснована актуальность тематики исследования, формулируются его цель и задачи,

отмечается научная новизна и практическая значимость, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор основных научно-методических подходов, которые используются при исследовании эмиссии электронов. Кратко рассмотрены положения теории автоэлектронной эмиссии и представлен математический аппарат, который применяется в дальнейшем в работе при анализе экспериментальных данных. Также проведен анализ современного состояния теории, применяемой для описания автоэлектронных эмиттеров, имеющих нанометровые размеры. Далее представлено общее описание экспериментальных методов и установок, которые традиционно используются при исследовании автоэмиссионных характеристик холодных катодов. В остальных главах работы указанные подходы и методы применяются в комплексе для изучения характерных особенностей автоэлектронной эмиссии из различных углеродных материалов и наноструктур.

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования автоэлектронных эмиттеров на основе графена, графита, одностенных углеродных нанотрубок и родственных им структур. Проведенные измерения краевой автоэлектронной эмиссии из пленок графена показали возможность получения достаточно стабильного тока с высокой плотностью при относительно низких пороговых напряжениях. Также было показано, что вольтамперные характеристики графеновых эмиттеров содержат выраженный гистерезис, который может быть объяснен действием пондеромоторных сил, приводящих к изменению геометрии эмитирующего края. Во второй части главы, представлено сравнительное исследование катодов на основе одностенных углеродных нанотрубок, обладающих металлическим и полупроводниковым типом проводимости. Обнаружены качественные отличия в их автоэмиссионных свойствах, которые были объяснены различной концентрацией носителей заряда в данных структурах. В заключение главы представлены результаты количественного сравнения

экспериментально полученных автоэмиссионных характеристик углеродных аморфных структур с субнанометровым радиусом и теоретических расчетов, проведенных с использованием различных подходов к описанию наноразмерных автоэлектронных эмиттеров.

Третья глава содержит описание результатов исследования автоэмиссионных катодов, состоящих из большого числа наноразмерных эмиттеров с высоким аспектным отношением, таких как одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, углеродные наностенки, нановолокна оксидов металлов и другие. Представлен достаточно большой объем экспериментальных данных, включая вольтамперные характеристики катодов, эмиссионные картины и карты распределения эмиссионных центров, полученные с помощью сканирующего автоэмиссионного микроскопа. Для анализа полученных данных разработана математическая модель многоэмиттерного катода, который был представлен в виде регулярного массива цилиндрических или пластинчатых эмиттеров, расположенных на плоской подложке. Проведенные расчеты показали, что такая относительно простая модель, позволяет адекватно объяснить полученные экспериментально параметры исследованных автокатодов в рамках экспериментальной погрешности измерения их структурных характеристик. Далее в главе проводится анализ возможности практического применения наноуглеродных катодов в вакуумных электронных приборах на примере нанографитных пленок. Представлены зависимости автоэмиссионных свойств нанографитных катодов от различных условий их эксплуатации, на основе которых определены их основные эксплуатационные параметры, включая максимальную плотность тока, долговечность и стабильность. В заключение главы продемонстрирована возможность применения нанографитных пленок в различных электронных устройствах, включая катодолюминесцентные лампы, источники рентгеновского излучения, катодно-сеточные узлы для клистронов и элементов космических аппаратов. В рамках этих исследований разработан ряд оригинальных конструкций и изготовлены прототипы устройств, которые

показали высокую перспективность практического использования нанографитных пленок.

В четвертой главе представлены результаты исследования автоэлектронной эмиссии из алмаза, на примере микроразмерных алмазных монокристаллов иглоподобной формы. На основе измерений вольтамперных характеристик и распределения эмитированных электронов по энергиям в зависимости от температуры определены механизмы электропроводности и автоэлектронной эмиссии для алмазных микроигл, которые в целом характерны для аналогичных острых эмиттеров на основе других полупроводниковых материалов. Проведенные исследования также показали, что в процессе эмиссии поверхностный слой алмазного эмиттера может быть преобразован в аморфный углерод и графит, что позволят значительно увеличить отбираемый ток до сотен микроампер. Кроме этого в работе представлен цикл исследований электронной эмиссии из алмазных микроигл под действием лазерного излучения с различными характеристиками. Измерения показали, что освещение приводит как к изменению эффективного сопротивления иглы за счет нагрева и фотопроводимости, так и к наблюдению различных механизмов эмиссии электронов, включая процессы фотостимулированной автоэлектронной эмиссии и надбарьерной фотоэлектронной эмиссии, причем при использовании импульсных лазерных источников с высокой мгновенной мощностью данные процессы носят многофотонный характер.

В пятой главе изложены результаты изучения нового эффекта, обнаруженного в ходе исследования эмиттеров на основе алмазных микроигл и углеродных нанотрубок, который проявлялся в виде вольтамперных характеристик автоэлектронной эмиссии волнообразной формы и соответствующих периодических изменений в энергораспределении эмитированных электронов. В случае алмазных микроигл было установлено, что возникновение данных особенностей в автоэмиссионных свойствах связано со структурной термо-полевой перестройкой эмиттера и образованием на его окончании наноразмерного углеродного выступа. Для объяснения

наблюдаемых экспериментальных зависимостей в работе предложена математическая модель эффекта, основанная на предположении о наличии туннельного барьера между эмитирующим наноразмерным выступом и остальным катодом, который приводит к одноэлектронному характеру туннелирования электронов в вакуум за счет явления кулоновской блокады. Проведенное моделирование показало хорошее согласие теории и эксперимента и позволило установить возможные причины подавления одноэлектронных эффектов при высоких напряжениях. Для алмазных микроигл, структура которых была установлена с помощью просвечивающей микроскопии, было получено достаточно хорошее количественное соответствие расчетных и экспериментальных параметров вольтамперных характеристик. Кроме этого, в автоэмиссионных экспериментах с алмазными микроиглами в ряде случаев наряду с эффектом кулоновской блокады также наблюдались особенности, характерные для эффекта резонансного туннелирования, связанного с размерным квантованием в наноэмиттере, которые находились в хорошем качественном согласии с предложенной в работе моделью.

Шестая глава посвящена изучению электромеханических явлений, которые наблюдались при исследовании автоэлектронной эмиссии из углеродных материалов и были обусловлены действием пондеромоторных сил, приводящих к механической деформации эмиттеров. Было обнаружено, что деформация углеродных нанотрубок и графеновых пленок в процессе автоэлектронной эмиссии может приводить к эффекту гистерезиса в вольтамперных характеристиках, изменению пространственного распределения электронов в пучке, а также к особенностям в картах распределения эмиссионных центров, получаемых с помощью сканирующей автоэмиссионной микроскопии. Наиболее ярким качественным эффектом, наблюдавшимся для эмиттеров на основе алмазных микроигл и углеродных нанотрубок, было возбуждение самоподдерживающихся электромеханических автоколебаний, наблюдавшихся в процессе автоэлектронной эмиссии при приложении

постоянного напряжения. Для объяснения данного эффекта, была предложена модель системы, содержащая гибкий автоэлектронный эмиттер, движущийся под действием силы упругости и электростатической силы. Анализ предложенной математической модели системы и проведенное моделирование показали хорошее согласие с полученными экспериментальными зависимостями и позволили сформулировать набор требований к параметрам системы, которые необходимы для реализации автоколебательного режима.

В заключении подведены общие итоги исследования, сформулированы основные выводы и результаты работы, а также рассмотрены перспективы дальнейшей разработки темы диссертации.

В диссертации представлен большой объем экспериментальных результатов, полученных для широкого круга различных углеродных материалов и наноструктур с использованием комплекса взаимодополняющих методик. Подробный анализ полученных данных, проведенный с использованием оригинальных физических моделей, позволил решить ряд важных фундаментальных и прикладных научных задач в области физики твердого тела, эмиссионной электроники, физики поверхности и нанотехнологий. С одной стороны, в работе получили развитие традиционные подходы к созданию и практическому использованию холодных катодов. Изложены и апробированы новые технические решения как по созданию традиционных устройств вакуумной электроники (рентгеновских трубок, СВЧ-приборов и др.), так и новых разновидностей вакуумных устройств (катодолюминесцентных ламп, элементов космических аппаратов, планарных графеновых эмиссионных структур, электронных источников с импульсным фотовозбуждением), учитывающих специфику катодов на основе исследуемых углеродных материалов. Вместе с этим в работе созданы и изучены новые типы эмиссионных систем на основе углеродных материалов, обладающие уникальными эмиссионными свойствами, которые открывают новые научные направления исследований. Одно из таких направлений связано с обнаруженной возможностью создания полностью углеродных эмиссионных

гетероструктур, в которых могут проявляться эффекты одноэлектронного и резонансного туннелирования. Развитие этих фундаментальных исследований потенциально может привести к созданию одноэлектронных автоэмиссионных катодов, представляющих высокий интерес для различных современных электровакуумных устройств. Другое направление связано с созданием и изучением систем с гибкими углеродными автоэлектронными эмиттерами, для которых был обнаружен ряд электромеханических эффектов, открывающих возможность создания наноэлектромеханических устройств нового типа.

В целом диссертационная работа Клеща В.И. представляет собой цельное и законченное научное исследование, выполненное и изложенное на высоком профессиональном научно-техническом уровне. Научные положения, выносимые на защиту, и выводы работы представляются хорошо обоснованными, а их достоверность и новизна не вызывают сомнения. Автореферат и опубликованные работы в полной мере и правильно отражают содержание диссертации. Представленные в работе результаты многократно докладывались автором на престижных профильных международных семинарах и конференциях.

Вместе с тем к диссертационной работе имеются некоторые вопросы и замечания:

1. На стр. 30 диссертации упоминаются две методики, использовавшиеся для измерения энергетического спектра электронов (задерживающий потенциал и полусферический анализатор). Указывается, что «Установки, оснащенные полусферическими анализаторами энергии электронов, позволяют получать спектры с высоким разрешением», однако конкретная величина этого разрешения не указывается. Какое разрешение было достигнуто в обоих случаях и в какой степени достигнутая величина разрешения соотносится с требованиями исследований?

2. Одним из пунктов научной новизны работы указано обнаружение зависимости автоэмиссии из углеродных нанотрубок от типа их проводимости (металлическая или полупроводниковая). Такая зависимость от типа

проводимости давно известна и достаточно хорошо изучена. Что в данном случае подразумевается под новизной?

3. На стр. 44 диссертации указывается ограничение линейной плотности тока при наблюдении эмиссии из края графена в 0,5 мА/см, что, с учетом толщины графена порядка 0,35 нм, эквивалентно величине  $10^4$  А/см<sup>2</sup>. Как эта величина соотносится с указываемыми в работе максимальным значением средней плотности тока в 1 А/см<sup>2</sup> для многоэммиттерных катодов (стр. 127), а также с оценкой предельного значения плотности тока эмиссии в  $10^8$  А/см<sup>2</sup> (стр. 126)?

4. Эксперименты по термическому окислению нанографитных пленок (раздел 3.4.1 диссертации) показывают наличие алмазной фазы на границе раздела между нанографитными чешуйками и кремниевой подложкой. Присутствие диэлектрического алмаза может влиять на электрическое сопротивление в контактной области и, тем самым, на протекание электрического тока. В работе ничего не говорится об учете этого фактора при анализе эмиссии электронов из таких пленочных материалов.

Сделанные замечания не затрагивают основных выводов диссертационной работы и не снижают ее общую высокую оценку. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.



Таким образом, соискатель Клещ Виктор Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
заместитель заведующего кафедрой вакуумной  
электроники федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Московский физико-технический  
институт (национальный исследовательский  
университет)»,  
Шешин Евгений Павлович

18.03 2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 408-59-44, e-mail: sheshin.ep@mipt.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. д. 9.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет), кафедра вакуумной  
электроники

Тел.: +7 (495) 408-42-54; e-mail: info@mipt.ru; <https://mipt.ru>

Подпись зам. заведующего кафедрой вакуумной электроники, д.ф.-м.н.,  
профессора Шешина Е.П. удостоверяю:

Ученый секретарь МФТИ

Евсеев Е.Г.

18.03 2024 г.