

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертационной работе Клеца Виктора Ивановича «Эмиссия электронов из углеродных наноструктур», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

1. Актуальность выбранной темы

Особое внимание к углеродным материалам наблюдается в течение последних тридцати лет в связи с открытием новых аллотропных форм углерода: фуллеренов, нанотрубок и графена –, за каждое из которых была присуждена Нобелевская премия. Данные открытия, особенно графена, положили начало буму исследований низкоразмерных систем, направленных как на изучение свойств таких материалов, так и на их практическое использование. Данная диссертация посвящена подробному изучению эмиссионных свойств наноструктур на основе углерода и поиску применений выявленных особенностей для технических приложений. Следует отметить, что наличие низкой размерности делает такие материалы весьма интересными, поскольку эффекты туннелирования и размерного квантования существенным образом могут определять их эмиссионные свойства. С практической точки зрения наибольший интерес связан с многоэмиттерными катодами большой площади, представляющими собой массив углеродных наноструктур на подложке, в частности, с использованием их в источниках рентгеновского излучения и электронных пушках для космических аппаратов. Благодаря сильным межатомным связям, углеродные материалы, такие как алмаз, углеродные нанотрубки и графен, имеют выдающиеся прочностные, упругие и другие механические свойства, исследование которых также относится к актуальным задачам, в том числе в связи с возможностью создания на их основе различных наноэлектромеханических систем. Все указанное выше, а также особенности именно низкой размерности углерода определяют высокую актуальность исследований, представленных в данной работе.

2. Степень обоснованности научных положений и выводов

Помимо очень тщательной экспериментальной работы, сконцентрированной, в первую очередь, на изучении эмиссионных характеристик, каждый исследованный объект был охарактеризован различными методами микроскопии высокого разрешения, что позволило однозначно сопоставить особенности эмиссии с геометрией и составом объекта. Это также дало возможность привлечь адекватные теоретические модели для описания наблюдаемых спектральных особенностей. Все представленные защищаемые положения и выводы диссертации основаны на соответствии экспериментальных данных и теоретических моделей, описывающих наблюдаемые конфигурации анализируемых объектов. Дополнительное воздействие лазерного излучения на объект также адекватно описано теорией. Помимо фундаментальных знаний о таких объектах получены практические результаты, что дополнительно подтверждает правильность и обоснованность результатов диссертации.

3. Оценка достоверности и новизны исследования

Достоверность результатов плотно связана с комплексным характером выполненного исследования. Во-первых, автор использовал ряд мощных методов структурной диагностики объектов, которые дополняли друг друга и позволяли вместе сделать надёжные выводы. Во-вторых, автор диссертации имеет глубокие знания в своей области и активно применял их при обсуждении результатов, что позволило ему устанавливать границу между известными сведениями и своими оригинальными результатами. Тщательное обсуждение диссертантом результатов собственных исследований в сопоставлении с литературными данными также обеспечило достоверность результатов. Наконец, степень достоверности результатов является высокой также вследствие обширного представления и обсуждения результатов на научных конференциях. Все полученные в диссертации данные являются новыми и оригинальными и опубликованы в ведущих мировых специализированных и общеприродных журналах, включая Applied Surface

Science, New Journal of Physics, Carbon и др., характеризующихся тщательным рецензированием.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

В диссертации впервые исследованы автоэмиссионные свойства ряда новых углеродных материалов, обнаружены и изучены новые эффекты, возникающие при автоэлектронной эмиссии из них, выявлены механизмы этих эффектов и предложены новые теоретические модели, описывающие их, а также разработаны новые конструкции электровакуумных устройств с углеродными холодными катодами. Автором развит и апробирован ряд интересных методик, которые могут быть использованы в практике исследований в области физики/химии низкоразмерных систем. Им выявлен ряд новых, достаточно неожиданных физических явлений, которые интересны и требуют дальнейшего развития и всестороннего исследования. Помимо полученных новых знаний предложены конкретные конструкции прототипов приборов, интересные для серийного производства.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

В настоящее время в России немного научных организаций, в которых проводятся исследования твердого тела на таком уровне. Это физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Санкт-Петербургский госуниверситет, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Новосибирский госуниверситет, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. Именно там полученные в диссертации результаты могут быть востребованы для изучения низкоразмерных систем, включая наноуглерод. Помимо академических институтов и университетов данный материал должен быть востребован в прикладных институтах и высокотехнологичных компаниях, нацеленных на разработку нового класса приборов, основанных именно на эффектах низкой

размерности. Наличие патентов в диссертации дает возможность напрямую использовать разработанные прототипы приборов

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность, достоинства и недостатки

Диссертационная работа выполнена и оформлена по классическому образцу. Диссертация состоит из Введения, 6 глав обзора литературы и представления оригинальных экспериментальных и теоретических результатов, Заключения, а также списка цитированной литературы. Объем диссертации состоит из 323 страниц и 175 рисунков. Список цитированной литературы состоит из 399 наименований.

Во введении описаны актуальность и степень разработанности темы исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, значимость и практическая ценность. Также подробно изложена методология и применение методов исследования, приведены положения, выносимые на защиту, аргументирована достоверность полученных результатов. Апробация работы проведена на многих Международных и Всероссийских научных конференциях

В обзоре литературы (Глава 1) даны общие сведения об объекте исследования, включая основные теоретические представления и экспериментальные подходы к исследованию автоэмиссии. Детальные и актуальные сведения о состоянии исследований в мире подробно рассмотрены в начале каждой главы (главы 3-6), содержащей оригинальные результаты диссертанта. В конце каждой главы приведены краткие Выводы. Такое построение в описании результатов следует признать удачным, поскольку объекты исследования и явления в них требуют отдельного пояснения.

В Главе 2 рассмотрены характерные особенности автоэмиссионных свойств холодных катодов на основе графена, углеродных нанотрубок и родственных им структур. В Главе 3 представлены результаты исследования многоэмиттерных холодных катодов, представляющих собой массивы

большого числа наноразмерных эмиттеров. Исследованы особенности автоэмиссионных свойств таких катодов, а также проанализированы потенциальные возможности их практического использования. В Главе 4 представлены результаты исследования электронной эмиссии из алмаза. Объектами являлись монокристаллы иглоподобной формы микронных размеров. В Главе 5 рассмотрены особенности электронного транспорта в системах, содержащих наноразмерные автоэлектронные эмиттеры, в которых проявляются одноэлектронные эффекты, обусловленные явлением кулоновской блокады. В Главе 6 представлены результаты исследования электромеханических эффектов в системах с гибкими автоэлектронными эмиттерами на основе графена, углеродных нанотрубок и алмазных микроигл. Именно данная глава мне показалась наиболее интересной.

В результате прочтения диссертации по ходу изложения материала для читателя снимаются практически все возможные вопросы, и диссертация дает ответы в рамках поставленных целей и задач.

Представленная диссертационная работа является законченным и цельным научным исследованием, в котором получены результаты, имеющие общенаучное значение для физики конденсированного состояния, так и множество конкретных результатов, которыми могут руководствоваться экспериментаторы в своей дальнейшей работе.

Учитывая профессиональное, четкое и грамотное изложение диссертационной работы, особо придираться не к чему. Имеется одно замечание/вопрос:

1. Как может сказываться на спектрах автоэмиссии квантование самого треугольного потенциального барьера, возникающего при приложении поля к объекту? Это скорее всего возможно при использовании обратной схемы – сканировании плоского объекта автоэмиссии острой иглой.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Несмотря на большой объем диссертации, опечаток и ошибок практически нет. Все указанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие ее квалифицировать как фундаментальное исследование, имеющее общее значение для материаловедения, поскольку решена важная научная проблема, связанная с фундаментальными особенностями эмиссии электронов из углеродных материалов, а также изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки для внедрения эмиссионных катодов в различных областях современной электронной техники. В целом, выполненная диссертационная работа имеет передовой мировой уровень, который зафиксирован в публикациях в ведущих физических журналах.

Степень достоверности результатов работы и сделанных выводов высокая, поскольку представленные результаты получены с использованием апробированных подходов, которые традиционно используются при исследовании явления автоэлектронной эмиссии. Структурные, электрофизические, механические, оптические и другие характеристики изучаемых в работе материалов были получены с применением стандартных аналитических методов. Достоверность представленных результатов также определяется высокой повторяемостью и согласованностью с результатами теоретических расчетов, а также с результатами исследований, полученными другими авторами.

Диссертация написана грамотным, лаконичным и профессиональным языком. Оформление диссертации проведено по требованиям. Выводы и заключения к главам обоснованы.

Считаю, что диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, а также критериям, определенным п. 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 Клец Виктор Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Официальный оппонент

Заведующий отделом технологий и измерений атомного масштаба

ИОФ РАН

д.ф.-м.н.

К.Н. Ельцов

26.03.2024

Контактные данные:

тел.: , e-mail: eltsov@kapella.gpi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена

диссертация: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119991 Москва, ул. Вавилова, д.38, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

тел.: +7 (499) 5038769; e-mail: eltsov@kapella.gpi.ru

Подпись сотрудника ИОФ

ВРИО ученого секретаря I

,
В.В. Глушков