

Крель Святослав Игоревич

**АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ
ИЗ БЕЗОСТРИЙНЫХ НАНОСТРУКТУР**

Специальность 01.04.04 физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015 год

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Гнучев Николай Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Шешин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук (01.04.07), профессор кафедры вакуумной электроники государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Москва;

Павлов Виктор Георгиевич, доктор физико-математических наук (01.04.04), старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 18 июня 2015 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" по адресу: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, уч. корпус 4, аудитория 305.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" и на сайте университета www.spbstu.ru.

Автореферат разослан "___" _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. т. н., профессор

Коротков Александр Станиславович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В течение последних десятилетий многие формы наноструктурированного углерода стали рассматриваться в качестве перспективных материалов для использования в составе «холодных» источников электронов [1, 2]. Первыми из них практическое применение нашли углеродные нанотрубки [3], ныне используемые в источниках микроволнового, оптического и рентгеновского излучений, в плазменных устройствах, космических двигателях, микроэлектронных компонентах и датчиках. Однако технологии изготовления упорядоченных массивов нанотрубок остаются достаточно сложными и дорогими. Помимо этого, не находит удовлетворительного решения проблема деградации свойств таких массивов в процессе работы. Эти обстоятельства стимулируют активные исследования альтернативных нанотрубкам углеродных эмиссионных материалов и структур, включая алмазные, алмазоподобные, аморфные, нанографитовые и композитные пленки. Общими чертами всех перечисленных материалов являются неоднородность состава и разупорядоченность структуры, а также относительно «гладкая» топография поверхности без выраженных острий или ребер. Во многих экспериментах была продемонстрирована способность таких материалов к низковольтной полевой эмиссии электронов, однако разработка практических технологий создания холодных катодов на их основе затрудняется неполным пониманием реализующегося в этом случае эмиссионного механизма. В литературе предлагается несколько принципиально различных его моделей, чаще всего описывающих многоступенчатый туннельный перенос электронов между наноразмерными областями с сильно различающимися электронными свойствами. Однако как детали этого процесса, так и структура активного центра низковольтной эмиссии остаются невыясненными.

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей и условий работы плоских углеродосодержащих полевых эмиттеров различной природы и создание на этой основе физической модели процессов, приводящих к низковольтной эмиссии электронов в исследуемых структурах.

Основные задачи работы:

– Анализ влияния морфологических параметров углеродосодержащих пленок различного состава, таких как толщина пленки, размер наночастиц, плотность расположения и фазовый состав островков, тип подложки, на характеристики и параметры низковольтной полевой эмиссии электронов.

– Выявление возможностей и условий термополевой обработки исследуемых углеродосодержащих полевых эмиттеров для активирования и стабилизации их эмиссионных свойств.

– Определение (на основании полученных экспериментальных данных) микроскопических механизмов, ответственных за реализацию низковольтной полевой эмиссии электронов.

– Построение феноменологической и количественной моделей низковольтной эмиссии электронов из безострийных наноуглеродных материалов и структур.

Научная новизна работы. В диссертации впервые получены следующие результаты:

1. Установлено, что эмиссионные свойства большинства изученных разновидностей нанопористого углерода весьма близки – величины пороговой напряженности электрического поля для лучших образцов каждого вида лежат в диапазоне 2 – 3 В/мкм. Определено, что способность к низковольтной эмиссии электронов не проявляется при исчезновении наноразмерных пор и, соответственно, при многократном уменьшении величины удельной поверхности.

2. Обнаружено, что наименьшая величина порогового поля для никель-углеродных нанокompозитных покрытий на кремнии может составлять менее 1 В/мкм. Оптимальный (с точки зрения эмиссионных свойств) размер никелевых частиц составляет около 20 нм. Для активирования эмиссионных свойств сплошных покрытий (где никелевые частицы составляют более одного целого монослоя) требуется термическая обработка при температурах 470 – 750°C. Определено, что температурная зависимость эмиссионных свойств наиболее сильно проявляется для покрытий большой толщины, (200 нм) а также покрытий, нанесенных на подложки с дырочной проводимостью.

3. Для островковых углеродных пленок на кремниевых подложках установлено, что низковольтная полевая эмиссия обусловлена присутствием определенного морфологического элемента – изолированных островков толщиной 2 – 5 нм и поперечными размерами 10 – 50 нм. Покрытия, содержащие указанные островки, либо изначально проявляют хорошие эмиссионные свойства (величина порогового поля может составлять 2 В/мкм и менее), либо такие эмиссионные свойства могут быть активированы прогревом при температурах 300 – 800°C.

4. На основании полученных экспериментальных данных разработана общая феноменологическая модель эмиссионного механизма, а также построена и реализована в виде компьютерной программы численная модель. Эта модель позволила количественно интерпретировать как полученные в данной работе эмиссионные характеристики в статических полях, так и известные из литературы [4] экспериментальные данные о гистерезисе эмиссии из нанопористого углерода в импульсном электрическом поле.

Практическая значимость работы определяется сделанными в ней рекомендациями по созданию низковольтных эмиттеров электронов на основе безострийных нанокompозитных материалов и структур. Благодаря своим уникальным свойствам, такие эмиттеры могут быть использованы при создании долговечных, эффективных и безынерционных холодных катодов, способных

найти применение в составе источников микроволнового, оптического и рентгеновского излучений, в плазменных устройствах, космических двигателях, микроэлектронных компонентах и датчиках.

Объекты и методы исследования.

В представляемой диссертационной работе исследовались образцы наноуглеродных материалов и покрытий следующих видов:

- нанопористый углерод, получаемый высокотемпературным хлорированием порошков карбидов кремния, титана, бора, циркония и молибдена;
- островковые углеродные пленки, нанесенные на поверхность кремниевой подложки методом химического осаждения из газовых смесей, содержащих метан или ацетилен;
- аналогичные углеродные пленки, нанесенные методом магнетронного распыления графитовой мишени;
- никель-углеродные композитные пленки на кремниевых подложках, полученные методом химического осаждения из газовой смеси, содержащей металлоорганическое соединение.

Для определения структуры и состава исследуемых материалов использовались методы:

- просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ);
- сканирующей электронной микроскопии (СЭМ);
- атомно-силовой микроскопии (АСМ);
- рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС).

Эмиссионные характеристики образцов измерялись в вакуумных условиях при давлении остаточных газов $\sim 10^{-5}$ Па с использованием двух специально созданных экспериментальных стендов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Необходимыми условиями возникновения низковольтной полевой эмиссии углеродосодержащих пленок являются:

- для слоев нанопористого углерода – наличие наноразмерных пор (0,5–6 нм) и высокой удельной поверхности (более 800 м²/г);
- для никель-углеродных покрытий на кремнии – наличие никелевых частиц с оптимальным размером ~ 20 нм;
- для островковых углеродных пленок на кремнии – существование изолированных островков высотой 2-5 нм и поперечными размерами 10-50 нм.

2. Термополевое активирование низковольтной полевой эмиссии углеродосодержащих наноструктурированных слоев на различных подложках, позволяет значительно повысить (на 2-3 порядка) и стабилизировать эмиссионную эффективность.

3. Механизм низковольтной полевой эмиссии из безострийных наноуглеродных структур, разделяется на следующие этапы: 1) туннельный перенос электронов из объема эмиттера в активные электропроводящие центры-домены, при этом энергия этих электронов существенно превышает локальное значение энергии Ферми; 2) перемещение внедренных в домен «горячих» электронов к вакуумной границе с малыми потерями энергии и выход их из эмиссионного центра в вакуум.

4. Разработанная на основе феноменологических представлений численная модель низковольтной полевой эмиссии, реализованная в виде компьютерной программы, адекватно описывает весьма сложное – по степени и характеру отклонения от предсказаний классической теории Фаулера-Нордгейма – поведение эмиссионных характеристик наноуглеродных эмиттеров в статических и импульсных полях.

Достоверность результатов, приведенных в работе, обеспечивается использованием комплекса современных экспериментальных методик. В частности, взаимодополняющие данные о составе, структуре и топографии поверхностного слоя изучаемых образцов получались с помощью методов атомно-силовой микроскопии, просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, а также рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Анализ данных проводился с использованием современного лицензионного программного обеспечения. Представленные в диссертации выводы соответствуют существующим теоретическим представлениям об особенностях структуры и свойств подобных материалов и покрытий. Они подтверждаются исследованиями аналогичных материалов и покрытий, сделанными другими авторами.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на Международной научно-практической конференции в рамках недели науки (Санкт-Петербург, 2009-2014гг.), Всероссийском конгрессе молодых ученых" (Санкт-Петербург, 2012), Международной конференции "International Conference on Ion-Surface Interactions" (Ярославль, 2013), Международной конференции-школе "Advanced Carbon Nanostructures and Methods of Their Diagnostics" (Санкт-Петербург, 2013), 11^{ой} Международной конференции "Advanced Carbon NanoStructures" (Санкт-Петербург, 2013), Молодежной научной конференции «Студенты и молодые ученые – инновационной России» (Санкт-Петербург, 2013).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 8 статей в рецензируемых журналах и 6 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Результаты, изложенные в диссертации, и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Экспериментальные исследования проводились автором лично, обработка экспериментальных данных проводилась совместно с соавторами. Автор внес вклад в интерпретацию

полученных результатов и в написание статей, раскрывающих содержание работы.

Структура диссертации. Диссертация изложена на 118 страницах и состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 53 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 195 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, определена цель работы, обоснованы научная новизна и значимость, а также практическая ценность работы, достоверность результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Содержатся сведения об апробации работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по данному вопросу. Кратко охарактеризованы различные виды углеродных материалов, их классификация и свойства. Рассмотрены основные технологии приготовления различных видов углеродных наноматериалов и покрытий, а также методы управления их свойствами. Описаны эмиссионные свойства различных видов наноуглерода, имеющих наилучшие перспективы использования в составе полевых эмиттеров: нанотрубок, графена и нанографита и структур на их основе, алмазных и алмазоподобных пленок и композитных структур. Уделено отдельное внимание таким особенностям их эмиссионных характеристик, как различные виды гистерезиса, возможность активирования и температурная зависимость.

Далее подробно рассмотрены модели эмиссионного механизма, предложенные различными авторами, и сделан вывод об отсутствии общепринятого мнения по данному вопросу. На основании анализа литературных данных обосновываются задачи диссертационной работы.

Во второй главе описываются конструкции экспериментальных приборов и методики измерения эмиссионных характеристик изучаемых материалов и покрытий, фиксации пространственного распределения тока эмиссии.

Перечислены и кратко охарактеризованы использованные методы исследования состава и морфологии образцов, обоснован их выбор.

В третьей главе излагаются результаты проведенных экспериментальных сравнительных исследований морфологии и эмиссионных свойств нескольких видов нанокремниевых материалов и покрытий, направленных на определение модели реализующегося для них механизма низковольтной полевой эмиссии. Типичные микроскопические изображения поверхности исследовавшихся материалов приведены на рис. 1.

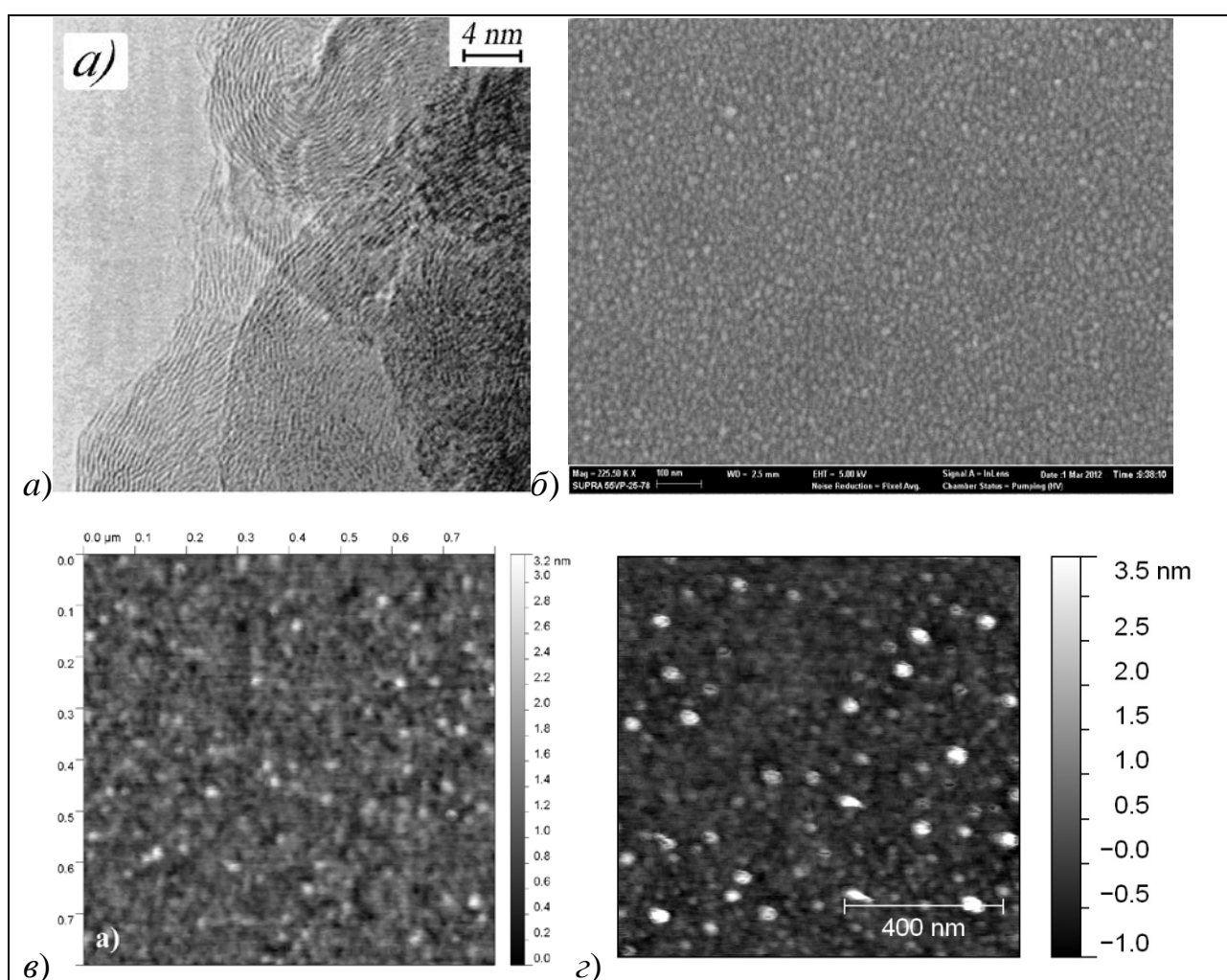


Рисунок 1. Типичные микроскопические изображения объектов исследования: *а)* – нанопористый углерод, изображение получено с помощью метода ПЭМ; *б)* – никель-углеродный композит, СЭМ; *в)* – островковая углеродная пленка, полученная методом химического осаждения из газовой фазы, АСМ; *г)* – островковая углеродная пленка, полученная методом магнетронного распыления графитовой мишени, АСМ.

Нанопористый углерод (НПУ, рис.1 а) был выбран как достаточно популярный объект исследования, имеющий перспективы практического использования в нескольких областях. Для опытов были выбраны образцы НПУ различной морфологии, являющиеся производными карбидов разных элементов (кремния, титана, бора, циркония и молибдена). Образцы, изготовленные на базе карбида кремния, были получены хлорированием при различных температурах. Структура разных образцов полученного таким образом НПУ имела как сходные черты (высокую пористость, присутствие аморфного углерода и графитоподобных доменов), так и различия. Различия характеризовались количественными параметрами, такими, как массовая плотность, величина удельной поверхности и средний размер пор. Исследования показали, что за единственным исключением, все разновидности НПУ обладали близкими эмиссионными свойствами. Это подтверждает рис.2 а, где приведены типичные эмиссионные характеристики образцов НПУ, произведенных из разных карбидов. Значение порогового электрического поля них составляло 2-3 В/мкм. Исключение составляла разновидность НПУ, приготовленная из карбида кремния при наивысшей температуре хлорирования 2000°С. Такой материал не эмитировал электроны в полях напряженностью до 10 В/мкм. Его структурной особенностью является низкая величина удельной поверхности, связанная с отсутствием малых нанопор, замещенных более крупными мезопорами (размером более 20 нм).

Анализ полученных для НПУ эмиссионных характеристик и параметров показал, что его структура слишком сложна, а возможности ее видоизменения недостаточны для нахождения соответствия между структурой покрытий и уровнем эмиссии. Никель-углеродный наноккомпозит был выбран для последующих исследований как материал, наноразмерная структура которого (размеры и пространственное расположение проводящих и плохо проводящих областей) хорошо поддается управлению и контролю в процессе изготовления и в ходе экспериментов.

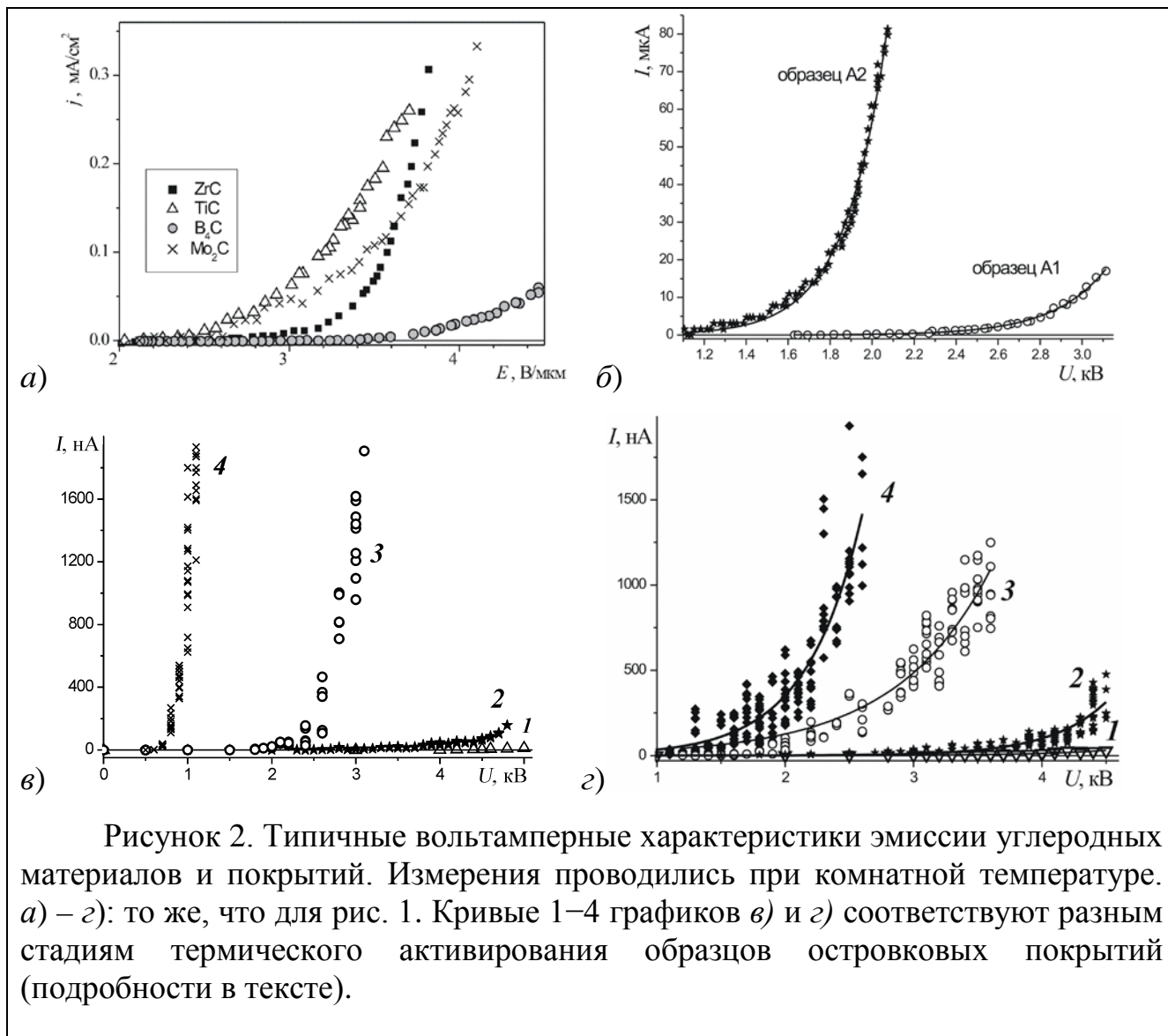


Рисунок 2. Типичные вольтамперные характеристики эмиссии углеродных материалов и покрытий. Измерения проводились при комнатной температуре. а) – г): то же, что для рис. 1. Кривые 1–4 графиков в) и г) соответствуют разным стадиям термического активирования образцов островковых покрытий (подробности в тексте).

Композитные покрытия наносились на кремниевые подложки методом химического осаждения металлоорганики из газовой фазы. Условия реакции были подобраны таким образом, чтобы осаждаемая пленка представляла собой совокупность никелевых частиц приблизительно сферической формы с размерами от 5 до 50 нм (Рис. 1 б), погруженных в углеродную матрицу. Толщина покрытия варьировалась в широких пределах. Было установлено, что композит обладают способностью к полевой эмиссии электронов в полях напряженностью от 1-5 В/мкм (рис. 2 б). Оптимальные, с точки зрения возможности достижения наилучших эмиссионных свойств, размеры никелевых частиц составляют приблизительно 20 нм. Для проявления эмиссионной активности сплошными покрытиями (содержащими один или более полных

слоев никелевых частиц) требовалась их термическая обработка при температурах 470–750°C. При увеличении температуры покрытий эмиссионные токи, как правило, возрастали, причем температурный эффект был наиболее сильно выражен для покрытий большей толщины, а также для покрытий на подложках с дырочной проводимостью.

В целом, полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии структуры углеродной матрицы на эмиссионные свойства композита. Поэтому, несмотря на бóльшую определенность в сравнении с НПУ, структура нанокompозита все еще слишком сложна для того, чтобы сравнительные исследования эмиссионных и морфологических свойств образцов позволили однозначно установить действующий механизм низковольтной эмиссии. Поэтому для последующих исследований была выбрана еще более простая, чисто углеродная двумерная наноструктура, представляющая собой тонкую углеродную пленку на кремниевой подложке.

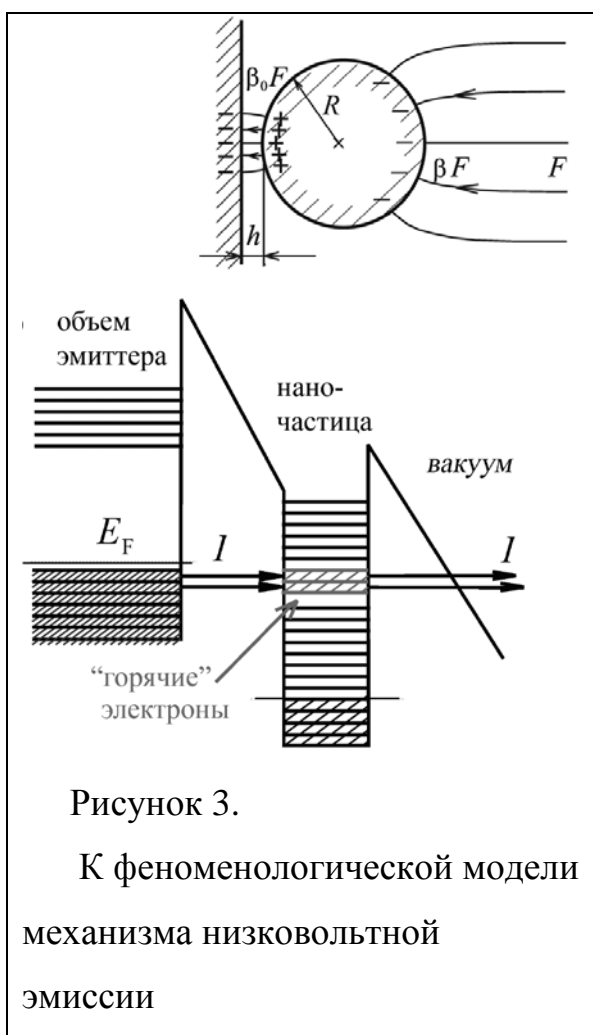
Исследуемые покрытия, имеющие островковую структуру (рис. 1 в), создавались методом химического осаждения из потока метана или ацетилена при температуре 400–760°C. На поверхности некоторых из полученных образцов, помимо наноразмерных островков, присутствовал углерод и в иных формах. Однако проведенные исследования показали, что эмиссионные свойства покрытий определяются именно изолированными островками толщиной 2 – 5 нм и поперечными размерами 10 – 50 нм.

Низковольтная полевая эмиссия таких островков легко активировалась прогревом образцов при температурах 400 – 800°C. На рис. 2, в показан результат активирования прогревом при температуре 720°C: кривые 1-4 снимались через каждые 10 минут прогрева. В ряде случаев покрытия, содержащие такие островки изначально проявляли хорошие эмиссионные свойства, что, по-видимому, свидетельствует о наличии у них структуры, близкой к оптимальной.

Для дополнительной проверки связи феномена низковольтной эмиссии с углеродными островками указанных размеров была проведена дополнительная серия экспериментов с аналогичными углеродными покрытиями (рис. 1 з), созданными иным методом – магнетронным распылением графитовой мишени.

На рис. 2, з представлены результаты термополевого активирования (560°C с отбором тока эмиссии) одного из таких образцов. Кривые сняты с интервалом времени прогрева 100 минут. Эксперименты подтвердили предположение о наилучших эмиссионных свойствах покрытий, составленных островками указанных выше размеров (рис.2, з). Установлено, что частицы большего и меньшего размера, независимо от их фазового состава в качестве центров облегченной эмиссии электронов не столь эффективны.

В четвертой главе работы приводится описание феноменологической модели эмиссионного механизма, предлагаемой на основании анализа всего



комплекса полученных экспериментальных данных. В соответствии с ней (рис.3), активные центры низковольтной эмиссии представляют собой электропроводящие наноразмерные домены – например, частицы никеля размером около 20 нм, углеродные островки толщиной 1 – 5 нм и поперечными размерами 10 – 50 нм или углеродные частицы, входящие в состав нанопористого углерода. Электрическая поляризация этих доменов приводит к усилению приложенного извне электрического поля на туннельном контакте, отделяющем такой домен от объема эмиттера, следствием чего

становится появление разности потенциалов между доменом и объемом. Из объема эмиттера в домен туннельно инжектируются электроны, энергия которых в домене существенно превышает локальное значение энергии Ферми. Время релаксации (потери энергии) генерируемых таким образом «горячих» электронов в домене аномально велико из-за присущей изолированным наноразмерным системам низкой эффективности электрон-фононного взаимодействия. Поэтому «горячие» электроны могут с малыми потерями перемещаться через домен к вакуумной границе и с высокой вероятностью туннелировать через поверхностный барьер, выходя в вакуум.

Далее в диссертации представлена разработанная численная модель, реализованная в виде компьютерной программы и созданная на основе описанной выше феноменологической модели эмиссионного механизма. Модель позволяет задавать произвольные спектры разрешенных состояний объема эмиттера и промежуточной области и базируется на следующих положениях:

- перенос электронов из объема эмиттера в вакуум происходит через промежуточную область, отделенную от объема эмиттера и от вакуума туннельными барьерами;

- учитывается изменение потенциала промежуточной области под действием протекающих токов;

- процесс происходит без учета релаксации «горячих» электронов, т. е. возможности изменения энергии электронов внутри промежуточной области.

Проведенное тестирование численной модели показало, что даже при простейших предположениях о спектре энергетических состояний поверхностного домена модель позволяет адекватно описывать многократно наблюдавшиеся в наших экспериментах отклонения статических эмиссионных характеристик от линейности в координатах Фаулера-Нордгейма, а также известные из литературы [4] закономерности гистерезиса токовых эмиссионных характеристик наноуглеродных материалов в импульсных полях.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы:

1) Низковольтная полевая эмиссия наблюдалась для всех исследованных безострийных форм наноуглерода при пороговых значениях напряженности электрического поля менее 5 В/мкм, что позволяет предположить единство реализующегося для них эмиссионного механизма.

2) Эмиссионные свойства образцов существенно улучшаются при термополевой обработке: выдержке при повышенной температуре с отбором или без отбора тока полевой эмиссии. Оптимальная температура и время ее воздействия (300-800°C, десятки минут) коррелировали со значениями, которые требуются для трансформации наноразмерных углеродных доменов из sp^3 - в sp^2 -форму.

3) Эмиссионная способность каждого из исследованных материалов (количественно характеризуемая, например, пороговым значением напряженности поля), определяется морфологией образцов. Последняя зависит как от технологии изготовления материала, так и от последующей эволюции в ходе термополевого активирования.

4) Подтвержден туннельный характер наблюдаемой эмиссии: токовые характеристики демонстрировали экспоненциальное поведение, чему соответствовали прямолинейные участки этих характеристик в координатах Фаулера-Нордгейма (ФН). В то же время, в области больших токов на характеристиках ФН зачастую присутствовали изломы, что является свидетельством многоступенчатости процесса эмиссии (последовательного преодоления электронами нескольких барьеров).

5) Из всех исследованных видов наноуглерода наилучшими эмиссионными свойствами обладали образцы, содержавшие (заведомо или предположительно) в своем составе четко выделенные и, вероятно, электрически изолированные от соседних областей, нанодомены малого размера – порядка единиц или нескольких десятков нанометров. В то же время, не наблюдалось влияния на эмиссионные свойства со стороны таких

морфологических элементов, как крупные наночастицы (сотни нм), «лоскуты» графена или наноконусы. Сплошные углеродные пленки без выраженной структуры также не обнаруживали способности к низковольтной эмиссии.

6) Выявленные в ходе работы экспериментальные закономерности нашли единое объяснение в рамках разработанной феноменологической модели механизма низковольтной полевой эмиссии из безострийных наноуглеродных структур.

7) Созданная на основании феноменологической модели численная модель низковольтной полевой эмиссии позволяет адекватно описывать обнаруженные отклонения статических эмиссионных характеристик от линейности в координатах Фаулера-Нордгейма и количественно интерпретировать известные из литературы закономерности гистерезиса токовых эмиссионных характеристик наноуглеродных материалов в импульсных полях.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xu, N.S. Novel cold cathode materials and applications [Text] / N.S. Xu, S. Ejaz Huq // Materials Science and Engineering R: Reports. – 2005. – Vol. 48, No 2-5. – P. 47-189.
2. Obraztsov, A.N. Vacuum electronic applications of nano-carbon materials [Text] / A.N. Obraztsov // In: Nanoengineered Nanofibrous Materialas, ed. By S. Guceri et al. – 2004, Kluwer Acad. Publ., the Netherlands. – P. 327-338.
3. Елецкий, А.В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок [Текст] / А.В. Елецкий, // УФН. – 2010. – Т. 180, Вып.9. – С. 897-930.
4. Архипов, А.В. Гистерезис импульсных характеристик автоэлектронной эмиссии с наноуглеродных пленок [Текст] / А.В. Архипов, М.В. Мишин, Г.Г. Соминский, И.В. Парыгин // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, Вып. 10. – С. 104-110.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Krel, S.I. Field-induced electron emission from graphitic nano-island films at silicon substrates [Text] / S.I. Krel, A.V. Arkhipov, P.G. Gabdullin, M.V. Mishin, A.L. Shakhmin, S.K. Gordeev, S.B. Korchagina // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2012. – Vol. 20, No 4-7. – P. 468-472.
2. Крель, С.И. Простая модель облегченной полевой эмиссии электронов из наноматериалов [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – Вып. 1. – С. 74-81.
3. Крель, С.И. Роль наночастиц в полевой эмиссии электронов из углеродных материалов [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов, Н. М. Гнучев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – Вып. 4 (158). – С. 98–103.
4. Krel, S.I. Correlations in field electron emission current from local spots at nanoporous carbon films [Text] / S.I. Krel, A.V. Arkhipov, M.V. Mishin, A.A. Uvarov // St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. – 2013. – No 4-2 (182). – P. 123-128.
5. Krel, S.I. Field electron emission from a nickel-carbon nanocomposite [Text] / S.I. Krel, V.S. Protopopova, M.V. Mishin, A.V. Arkhipov, P.G. Gabdullin // Nanosystems: physics, chemistry mathematics. – 2014. – Vol. 5, No 1. P. 178-185.
6. Krel, S. Field-induced electron emission from nanoporous carbons [Text] / S. Krel, A. Arkhipov, S. Davydov, P. Gabdullin, N. Gnuchev, A. Kravchik // Journal of Nanomaterials. – 2014. – Vol. 2014. – 190232.
7. Крель, С.И. Низковольтная автоэлектронная эмиссия из углеродных пленок, полученных методом магнетронного распыления [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов, П.Г. Габдуллин, Н.М. Гнучев, А.Ю. Емельянов // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, Вып. 23. – С. 58–66.
8. Крель, С.И. Полевая эмиссия различных видов нанопористого углерода / С.И. Крель, А.В. Архипов, П.Г. Габдуллин, Н.М. Гнучев, С.Н. Давыдов, Б.А. Логинов

// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2015. – Вып. 1(213). – С. 77-92.

9. Крель, С.И. Исследование образцов автоэммиттеров с помощью атомно-силового микроскопа [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов // Материалы международной научно-практической конференции, часть IX. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 117-118.

10. Крель, С.И. Исследование облегченной полевой эмиссии электронов из тонких пленок на кремнии [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов // Сборник тезисов докладов всероссийского конгресса молодых ученых. – Санкт-Петербург, 2012. Вып. 2. – С. 391-392.

11. Krel, S.I. Preparation and characterization of Ni carbon nanocomposite thin films [Text] / S.I. Krel, O.A. Podsvirov, A.I. Titov, A.Ya. Vinogradov, M.V. Mishin, V.S. Protopopova, V.S. Belyakov, A.V. Arkhipov, P.G. Gabdullin, N.N. Karasev, P.A. Karaseov // International Conference on Ion-Surface Interactions – Yaroslavl, 2013.

12. Krel, S.I. Investigation of low-aspect-ratio carbonic field-emission nanostructures [Text] / S.I. Krel // Conference-School for Young Scientists “Advanced Carbon Nanostructures and methods of Their Diagnostics” CSYS’213. – Saint-Petersburg, July 01–05, 2013. – P. 37.

13. Крель, С.И. Автоэлектронная эмиссия из безострийных наноструктур [Текст] / С.И. Крель, А.В. Архипов, Н.М. Гнучев // Материалы работ молодежной научной конференции – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 23-24 мая 2013. – С. 164.

14. Krel, S.I. Field electron emission from a nickel-carbon nanocomposite [Text] / S.I. Krel, V.S. Protopopova, M.V. Mishin, A.V. Arkhipov, P.G. Gabdullin // International Conference “Advanced Carbon NanoStructures” – Saint-Petersburg, July 01–05, 2013. – P. 37.