

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А.М. Прохорова РАН

На правах рукописи

**Клещ Виктор Иванович**

**АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ ИЗ  
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **Образцова Елена Дмитриевна**

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор **Елецкий Александр Валентинович**, Российский научный центр «Курчатовский институт»

доктор физико-математических наук, профессор **Неволин Владимир Кириллович**, Московский государственный институт электронной техники (технический университет)

**Ведущая организация:**


Московский физико-технический институт (государственный университет)

Защита диссертации состоится 29 марта 2010 года на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу 119991, ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Автореферат разослан            февраля 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Макаров В.П.  
тел. +7 (499) 503-83-94

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Получение, исследование и применение наноматериалов является одним из актуальных направлений современной науки и техники. В последнее время значительный интерес привлекают исследования автоэлектронной эмиссии (АЭ) из новых типов наноматериалов, представляющих собой острийные (или лезвийные) структуры с нанометровыми характерными размерами. Наиболее ярким примером таких структур являются углеродные нанотрубки [1]. Отличительной особенностью наноэмиттеров, привлекающей к ним особое внимание, является относительно низкое значение напряжения, требуемое для возникновения заметных эмиссионных токов.

С практической точки зрения особо актуальными являются многоэмиттерные автокатоды, представляющие собой массивы острийных наноструктур, нанесенные на различные подложки. Оптимизация параметров таких автокатодов требует понимания фундаментальных научных закономерностей их работы. При этом характеристики многоэмиттерных катодов определяются как параметрами отдельных эмиттирующих центров, так и результатом их взаимного влияния в процессе эмиссии. Наряду с микроскопическими параметрами, характеризующими отдельные эмиссионные центры, для описания многоэмиттерных автокатодов также важны и макроскопические характеристики, представляющие собой усредненные значения напряженности электрического поля, плотности тока, плотности эмиссионных центров и т.д. Возможность получения значительных токов и однородной эмиссии с больших поверхностей, делает многоэмиттерные автокатоды привлекательными для создания различных устройств вакуумной электроники.

Наряду с углеродными нанотрубками активно исследуются автокатоды на основе других наноразмерных углеродных структур (наностенки или наночешуйки графита, наноалмаз), а также нановолокон оксидов некоторых металлов [2]. Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о чрезвычайно высокой эффективности указанных автокатодов [1, 2]. В то же время отмечается принципиальное отличие автоэмиссии из наноуглерода и из других материалов, несмотря на подобие их геометрических характеристик, работы выхода и других параметров, которыми должны определяться эмиссионные характеристики, в рамках модели Фаулера-Нордгейма [3, 4].

Для практического применения автокатодов одними из наиболее важных характеристик являются стабильность автоэмиссионного тока и максимально достижимая плотность тока. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что максимальные плотности тока, получаемые из многоэмиттерных катодов, существенно ниже локальных значений этого параметра, получаемых для отдельных острийных эмиттеров. Причина значительного снижения тока, а

также механизмы его деградации являются предметом интенсивных исследований и во многом остаются невыясненными. Несмотря на обилие экспериментальных данных, вопрос о стабильности автоэмиссионного тока и его зависимости от экспериментальных условий, также остается открытым [1]. Поэтому определение потенциальных возможностей многоэмиттерных автокатодов и поиск путей увеличения значений максимального тока и его стабильности является одной из актуальных научных и практических задач.

Дополнительным обстоятельством, определяющим интерес к многоэмиттерным автокатадам, являются уникальные механические свойства (прочность, упругость) образующих их наноструктур. Эти свойства оказывают существенное влияние на их автоэмиссионные характеристики вследствие электромеханических эффектов, возникающих при приложении напряжения. В частности, в экспериментальных исследованиях отмечается возбуждение механических колебаний гибких наноструктур при автоэмиссии под действием приложенного постоянного или переменного электрического поля [5]. Причины возникновения таких колебаний не были установлены. Исследование этих явлений особенно актуально в связи с перспективой их применения в наноэлектромеханических устройствах нового типа.

### **Цель работы**

Целью работы являлось определение закономерностей автоэлектронной эмиссии и электромеханических явлений, наблюдаемых для автокатодов на основе нанокристаллического углерода и нановолокон оксидов металлов, выявление взаимосвязи автоэмиссионных свойств со структурными, электронными и механическими характеристиками автокатодов, и определение возможностей их практического применения в электровакуумных устройствах.

### **В работе решались следующие задачи:**

- Создание экспериментального оборудования для измерения автоэмиссионных свойств наноматериалов.
- Проведение сравнительного экспериментального исследования и компьютерного моделирования эмиссии электронов из автокатодов на основе различных наноматериалов.
- Проведение сравнительного анализа низкополевой эмиссии электронов из автокатодов на основе гетерофазных нанотрубок, синтезированных из смеси углерода и нитрида бора.
- Экспериментальное исследование зависимости параметров нанографитных автокатодов от уровня давления остаточных газов.
- Разработка прототипов вакуумных электронных приборов.
- Проведение экспериментального исследования и компьютерного моделирования электромеханических явлений при автоэлектронной эмиссии из упругих эмиттеров на основе наноматериалов.

## **Научная новизна**

Впервые проведено компьютерное моделирование распределения электрического поля в вакуумном диоде с катодом в виде массива пластинчатых эмиттеров. Определена оптимальная плотность расположения эмиттеров, необходимая для достижения максимального тока. Проведены оценки максимальной плотности тока для катодов на основе наноструктурированных материалов.

Впервые проведено сравнительное экспериментальное исследование автоэмиссионных свойств гетерофазных нанотрубок, синтезированных из смеси углерода и нитрида бора, в зависимости от содержания нитрида бора в исходной смеси.

Впервые экспериментально продемонстрированы зависимости параметров нанографитных многоэмиттерных автокатодов от величины давления остаточных газов.

Разработан новый тип вакуумной катодолюминесцентной лампы с наноуглеродным автокатодом, продемонстрированы достоинства ее конструкции по сравнению с имеющимися аналогами.

Впервые экспериментально обнаружен эффект возникновения электромеханических автоколебаний в процессе автоэлектронной эмиссии в системе, представляющей собой вакуумный диод с автокатодом, обладающим упругими свойствами. Определена взаимосвязь параметров возбуждаемых автоколебаний с геометрическими и упругими характеристиками автокатодов и условиями эксперимента.

Создано экспериментальное оборудование, разработаны методики для проведения исследований автоэмиссионных свойств наноструктурированных материалов.

## **Практическая ценность**

Проведенные исследования свидетельствуют о высокой эффективности и стабильности автоэлектронной эмиссии из наноуглеродных катодов, что позволяет использовать их в устройствах вакуумной электроники. Разработанный прототип катодолюминесцентной лампы новой конструкции демонстрирует перспективность данной технологии.

Обнаруженное явление автоколебаний упругих эмиттеров при автоэлектронной эмиссии в постоянном поле, может быть использовано для создания принципиально новых устройств – генераторов переменного тока и электромагнитных волн в наноэлектромеханических системах.

## **Личный вклад диссертанта**

Диссертант лично выполнил экспериментальные исследования и провел компьютерное моделирование автоэлектронной эмиссии из различных

наноструктурированных материалов. Постановка задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов выполнены совместно с соавторами опубликованных работ при непосредственном участии соискателя.

### **Апробация работы**

Основные результаты были доложены на следующих международных конференциях:

1. 8<sup>th</sup> Biennial International Workshop “Fullerenes and Atomic Clusters” (IWFAC’2007) St. Petersburg (Russia), July 2-6, 2007.
2. GDR-I Nano-I Annual Meeting on Science and Applications of Nanotubes, Autrans (France), October 15-19<sup>th</sup>, 2007.
3. XXII Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, Kirchberg (Austria), March 1-8, 2008.
4. 5<sup>th</sup> Bilateral Russian-French Workshop on Nanoscience and Nanotechnologies, December, 1-2, 2008.
5. 2<sup>nd</sup> Int. Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Nanotechnology, Cambridge (UK), 6-8 January, 2008.
6. Первый Международный форум по нанотехнологиям, Москва (Россия), 3-5 декабря, 2008.
7. XXIII Int. Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials, Kirchberg (Austria), March 7-14, 2009.
8. International Workshop "Nanocarbon Photonics and Optoelectronics", Polvijärvi (Finland), August 3-9, 2008.
9. Второй Международный форум по нанотехнологиям, Москва (Россия), 6-8 октября, 2009.

### **Публикации**

Основные результаты опубликованы в 18 работах: 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, и 11 тезисов международных конференций. В результате проведенных исследований получен патент РФ на изобретение по заявке №2008141395/09(053681). Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и списка основных результатов. Ее объем составляет 135 страниц, включая 51 рисунок и список литературы из 122 наименований.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований.

**Первая глава** посвящена анализу литературных данных по автоэлектронной эмиссии (АЭ) из металлов и полупроводников. Рассмотрены характерные особенности АЭ из наноразмерных эмиттеров и многоэмиттерных катодов на основе различных наноматериалов.

В *первом параграфе* приведены некоторые наиболее общие сведения об АЭ из металлов и полупроводников. Рассмотрены основные положения теории Фаулера-Нордгейма (ФН), описывающей явление АЭ из металлов как туннелирование электронов проводимости через потенциальный барьер на поверхности твердого тела, образованный действием поляризационных сил и внешнего электрического поля [6]. Основным выводом теории является формула ФН для плотности тока эмитированных электронов, которая показывает, что заметный эмиссионный ток возникает при напряженностях поля порядка 1 В/нм, а при более высоких напряженностях потенциально возможно получение плотностей тока вплоть до  $10^{11}$  А/см<sup>2</sup>. На практике для достижения высоких полей автоэмиссионные катоды выполняются в виде острых или лезвий. Для получения больших интегральных токов используют многоэмиттерные автокатоды, представляющие собой массивы большого числа таких острий.

Во *втором параграфе* проводится рассмотрение особенностей АЭ из наноэмиттеров, имеющих форму острий с радиусом закругления у их окончания в несколько нанометров. Экспериментально показано [1, 2], что заметный ток из таких наноэмиттеров достигается при использовании разности потенциалов между электродами на несколько порядков ниже, чем для эмиттеров микронных размеров. Также наноэмиттеры позволяют получать рекордно высокие плотности тока. Теоретическое описание АЭ из острий нанометрового размера является сложной задачей, ввиду того, что размер эмитирующей области оказывается сравнимым с межатомным расстоянием. На настоящий момент не существует последовательной теории АЭ из наноэмиттеров. Большинство работ в этой области касается модификации теории ФН, разработанной для случая плоской поверхности.

В *третьем параграфе* приведены сведения об особенностях АЭ из многоэмиттерных катодов, выполненных на основе различных наноматериалов. Рассмотрены общие свойства массивов эмиттеров, в частности, влияние эффекта экранирования электрического поля близко расположенными эмиттерами и проявление имеющегося статистического разброса параметров эмиттеров в массиве. Приводятся некоторые общие методики экспериментального исследования АЭ из многоэмиттерных катодов, а именно, различные способы определения расстояния между электродами и методы оценки эмитирующей площади. Далее рассмотрены экспериментальные данные об автоэмиссионных свойствах катодов на основе различных наноматериалов, свидетельствующие об их высокой эффективности [1, 2]. При этом в

большинстве случаев отмечается хорошее согласие экспериментальных результатов с теорией ФН. Особое внимание уделено наноуглеродным катодам, обладающим уникально высокой эффективностью автоэмиссии, а именно, нанокристаллическим алмазным пленкам и массивам углеродных нанотрубок. Показано, что экспериментальные данные по АЭ из наноуглеродных материалов не могут быть адекватно интерпретированы в рамках теории ФН, разработанной для металлов. В конце параграфа рассмотрены вопросы стабильности АЭ из различных материалов и применения автокатодов в вакуумной электронике. Несмотря на большое количество экспериментальных данных, на данный момент остается неясным, в каких условиях, и какие именно факторы определяют стабильность работы того или иного катода [1, 6].

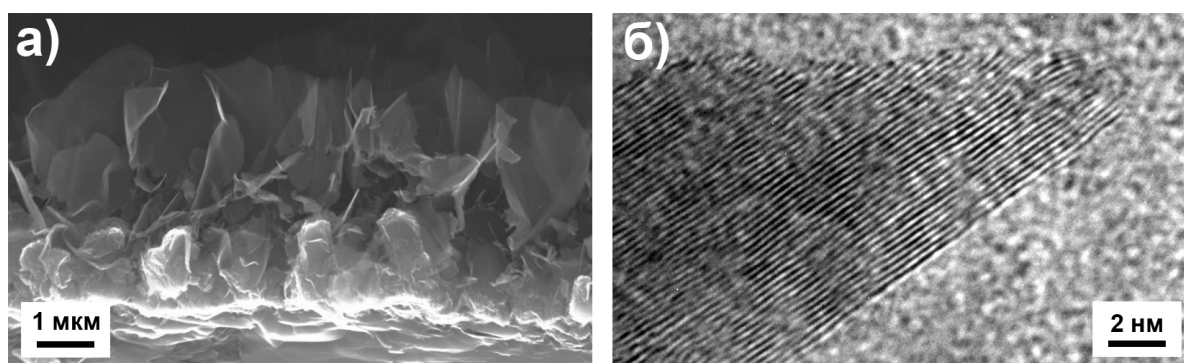
В *четвертом параграфе* рассмотрена взаимосвязь уникальных механических свойств наноразмерных структур (упругость, прочность и др.) с их автоэмиссионными свойствами. Упругие свойства нанотрубок проявляются в их способности к значительным обратимым деформациям под действием внешнего электрического поля, что может приводить к существенному изменению автоэмиссионного тока. В свою очередь наблюдение автоэмиссии позволяет охарактеризовать механические свойства одиночных нанотрубок, находящихся в состоянии резонансных механических колебаний, возникающих под действием внешнего электрического переменного поля. В то же время, недавние эксперименты показали, что электромеханические колебания при наблюдении автоэмиссии из гибких наноэмиттеров могут возникать также и под действием постоянного электрического поля. Этот новый эффект наблюдался при эмиссии из углеродных нанотрубок [5], при этом причины возникновения таких колебаний не были установлены.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию экспериментальных методик, использовавшихся в диссертационной работе для получения наноструктурированных материалов и исследования их структурно-морфологических и автоэмиссионных свойств, а также методов, использовавшихся при компьютерном моделировании явления автоэмиссии. В работе исследовались нанографитные пленки, одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, нановолокна из оксидов металлов ( $ZnO$ ,  $CuO$ ,  $V_2O_5$  и  $Fe_2O_3$ ), гетерофазные нанотрубки из углерода и нитрида бора.

В *первом параграфе* кратко описаны методы получения указанных наноструктурированных материалов. Нанографитные (НГ) пленки были получены с использованием оборудования, имеющегося на Физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, методом плазмохимического осаждения на кремниевых или никелевых подложках в плазме разряда постоянного тока, инициированного в газовой смеси метана и водорода. Такие пленки представляют собой пористый материал, состоящий из пластинчатых структур, имеющих преимущественную ориентацию их протяженной части в направлении перпендикулярном плоскости подложки (см. Рис. 1). В поперечном направлении размер этих пластинчатых образований составляет 50 – 100 нм у основания и 5 – 10 нм у

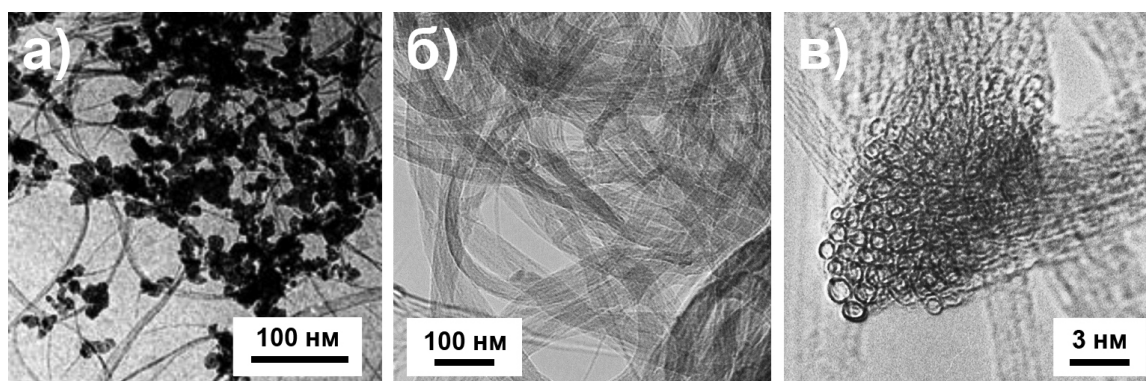


вершины. При этом размер в продольном направлении составляет от долей до единиц микрометра, а высота 1 – 2 мкм.



**Рис. 1.** (а) Изображение поперечного скола образца нанографитной пленки, выращенной на кремнии, полученное на растровом электронном микроскопе (РЭМ). (б) Изображение отдельного нанокристаллита графита, полученное на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ). Параллельные линии на изображении соответствуют отдельным атомным слоям.

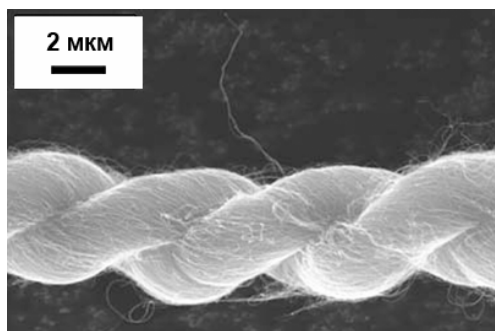
Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) были синтезированы в Институте общей физики им. А.М. Прохорова методом электрической дуги в атмосфере гелия из графитного порошка с использованием катализаторов Ni и  $Y_2O_3$ . В результате синтеза были получены порошкообразные материалы, содержащие не менее 20% ОУНТ (Рис. 2а). Полученные нанотрубки имели диаметры от 1,0 нм до 1,6 нм и находились, в основном, в пучках (Рис. 2в), с диаметром в пределах 3,0-13,0 нм. Для получения более чистого материала применялся метод селективного окисления исходного порошка, чередующегося с обработкой кислотой (HCl, HNO<sub>3</sub>) и отмывкой в дистиллированной воде, с последующим осаждением из водного раствора на пористый фильтр (Рис. 2б). Дуговой метод также использовался для синтеза гетерофазных нанотрубок из смеси графита и гексагонального нитрида бора в присутствии указанных катализаторов.



**Рис. 2.** (а) ПЭМ изображение неочищенного ОУНТ-содержащего порошка. (б) ПЭМ изображение очищенных ОУНТ. (в) ПЭМ изображение пучка ОУНТ.

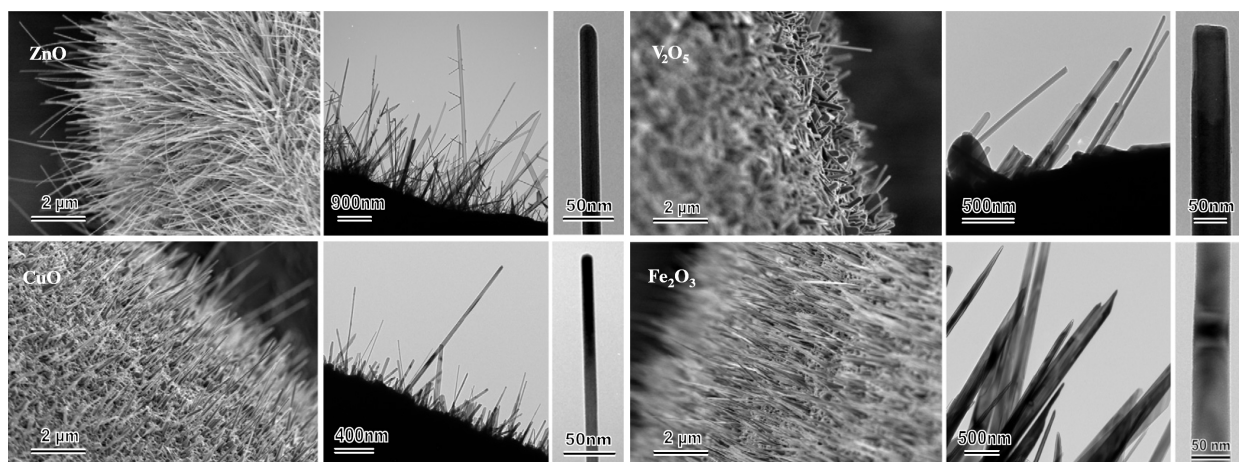
Многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) были получены в Университете Техаса в Далласе (США) методом газофазного химического осаждения в газовой смеси гелий – ацетилен, с использованием железа в качестве катализатора. После синтеза, в процессе механического вытягивания и

скручивания пучка нанотрубок из массива, были свиты волокна, состоящие из переплетенных между собой МУНТ. Отдельные волокна также свивались в нити. Волокна и нити использовались в качестве автокатодов. На Рис. 3 показано типичное РЭМ изображение одной из таких нитей, полученных свиванием 2-х волокон.



**Рис. 3.** РЭМ изображение нити, свитой из 2-х волокон, полученных из массива МУНТ.

Нановолокна оксидов металлов были получены в Технологическом университете г. Хельсинки (Финляндия) методом резистивного нагрева металлических проволок и фольг на воздухе при атмосферном давлении. Полученные нановолокна имели толщину от 10 до 50 нм, длину от 1 до 5 мкм, и имели преимущественную ориентацию перпендикулярно поверхности подложки (Рис. 4).



**Рис. 4.** Электронно-микроскопические изображения нановолокон оксидов металлов.

Во втором параграфе описаны методы изготовления катодов, использовавшиеся при исследовании автоэмиссионных свойств указанных наноматериалов. НГ пленки исследовались без дополнительной обработки непосредственно после синтеза. Образцы представляли собой кремниевые подложки размером 1x1 см или никелевые проволоки диаметром 1 мм и длиной 5 см с осажденной на их поверхность НГ пленкой. ОУНТ, содержащие порошковые материалы, полученные после дугового синтеза, наносились на двустороннюю клейкую проводящую ленту (углеродный скотч), наклеенную на стальную подложку, и прессовались металлической пластиной. В результате, спрессованный материал полностью покрывал поверхность ленты, площадь

поверхности которой составляла  $1 \text{ см}^2$ . Другой способ изготовления образцов с ОУНТ состоял в использовании очищенного материала в виде свободной мембраны толщиной около 0,1 мм, состоявшей из переплетенных между собой нанотрубок. Мембраны закреплялись на плоские металлические подложки с помощью углеродного скотча. Свитые из МУНТ волокна имели длину 1-2 см и диаметр 5-20 мкм. Волокна закреплялись на стальной подложке, с помощью проводящей серебряной пасты. Металлические фольги и проволоки с нановолокнами из оксидов металлов исследовались без дополнительной обработки. Фольги имели ширину 0,5 см, толщину 0,1 см и длину 1-2 см. Проволоки имели диаметр 0,25 мм и длину 1-3 см.

В *третьем параграфе* описана методика проведения АЭ экспериментов. Автоэмиссионные свойства образцов изучались в вакуумной камере при давлении остаточных газов до  $10^{-6}$  Торр. Для исследования АЭ свойств образцов в виде плоских катодов в качестве анода использовалась стеклянная пластина с прозрачным слоем из смеси оксидов олова и индия (ИТО). Проводящая ИТО пленка была покрыта слоем катодлюминофора, излучавшего свет под действием электронов, эмитированных из катода и бомбардирующих поверхность анода. Для проведения длительных измерений, а также для измерения больших плотностей эмиссионного тока использовался анод в виде полированной вольфрамовой пластины. Расстояние между анодом и катодом контролировалось с помощью механической подачи, снабженной микрометрическим винтом. Для исследования автоэмиссионных свойств образцов в виде проволок, они помещались на оси цилиндрического анода в виде стеклянной трубки диаметром 2 см, с нанесенной на ее внутреннюю поверхность ИТО пленкой, покрытой слоем люминофора. Измерения характеристик проволок и волокон также проводились и с плоским анодом. Для этого была разработана методика определения напряженности электрического поля на поверхности проволоки и проведено сравнение со случаем цилиндрической конфигурации анода.

Для измерения автоэмиссионного тока между электродами прикладывалось постоянное или импульсное напряжение. В режиме постоянного напряжения использовался источник напряжения Keithley 248, обеспечивающий напряжения до 5 кВ при токе до 5 мА. Источник был сопряжен с персональным компьютером. Измерения тока и вольтамперных характеристик (ВАХ) проводились с помощью оригинального программного обеспечения. Для реализации импульсного режима был разработан источник напряжения, позволяющий получать импульсы амплитудой до 20 кВ, длительностью 0,1 мс и периодом следования до 5 мс. Для контроля измерительной системы и записи данных использовался персональный компьютер, снабженный PCI платой Bordo 221. Автоэмиссионный ток амплитудой до 0,5 А измерялся с временным разрешением 0,1 мкс. При этом была реализована аппаратная система компенсации емкостного тока, возникающего между электродами, который вносил существенные искажения в сигнал автоэмиссионного тока.

Автоэмиссионные характеристики плоских катодов также исследовались с помощью автоэмиссионного сканирующего зондового микроскопа (SAFEM). Зондом (анодом) в этом случае являлась вольфрамовая игла с радиусом острия 10-20 мкм. Перемещение зонда над поверхностью плоского катода осуществлялось в трех взаимноперпендикулярных направлениях с помощью пьезоэлектрических преобразователей. Между зондом и катодом прикладывалось напряжение до 500 В. При этом измерялся автоэмиссионный ток до 0,5 мкА. Максимальный размер анализируемой с помощью SAFEM области составлял 1x1 мм.

В четвертом параграфе описаны методы компьютерного моделирования, использованные для численного расчета предложенных в работе моделей. Для решения уравнения Лапласа использовался метод конечных элементов, реализованный в математическом пакете FEMLAB. Численное решение систем дифференциальных уравнений проводилось методом Рунге-Кутты в математическом пакете MATLAB.

Третья глава диссертации посвящена описанию результатов исследования низкополевой эмиссии из многоэмиттерных катодов на основе различных наноматериалов. В первом параграфе представлено сравнительное исследование наноуглеродных автокатодов (одностенные и многостенные нанотрубки, графитные пленки) и автокатодов, состоящих из наноразмерных кристаллитов оксидов различных металлов ( $ZnO$ ,  $CuO$ ,  $V_2O_5$  и  $Fe_2O_3$ ). Используя вышеописанные методики, были измерены автоэмиссионные характеристики данных материалов. В Таблице 1 приведены значения пороговой напряженности поля  $E$ , соответствующей плотности тока  $0,1 \text{ mA/cm}^2$ , и максимальной плотности тока  $J_{\text{max}}$ , после достижения которой начиналось необратимое разрушение материала катода.

**Таблица 1.** Автоэмиссионные характеристики различных наноматериалов

Материал	$\phi$ (эВ)	$E$ (В/мкм)	$J_{\text{max}}$ (мА/см <sup>2</sup> )	$\beta$
НГ пленка	5	1,9	1000	50-200
ОУНТ пленка	5	1,5	100	100-5000
МУНТ волокно	5	2	50	1000-3000
$CuO$	4,5	6	100	15-300
$V_2O_5$	6,7	7	40	10-100
$Fe_2O_3$	5,6	12	5	20-500
$ZnO$	5,3	11	20	20-500

Приведенные данные свидетельствуют о том, что наноуглеродные автокатоды обеспечивают более низкие пороговые поля и позволяют получать более высокие плотности тока по сравнению с другими исследованными

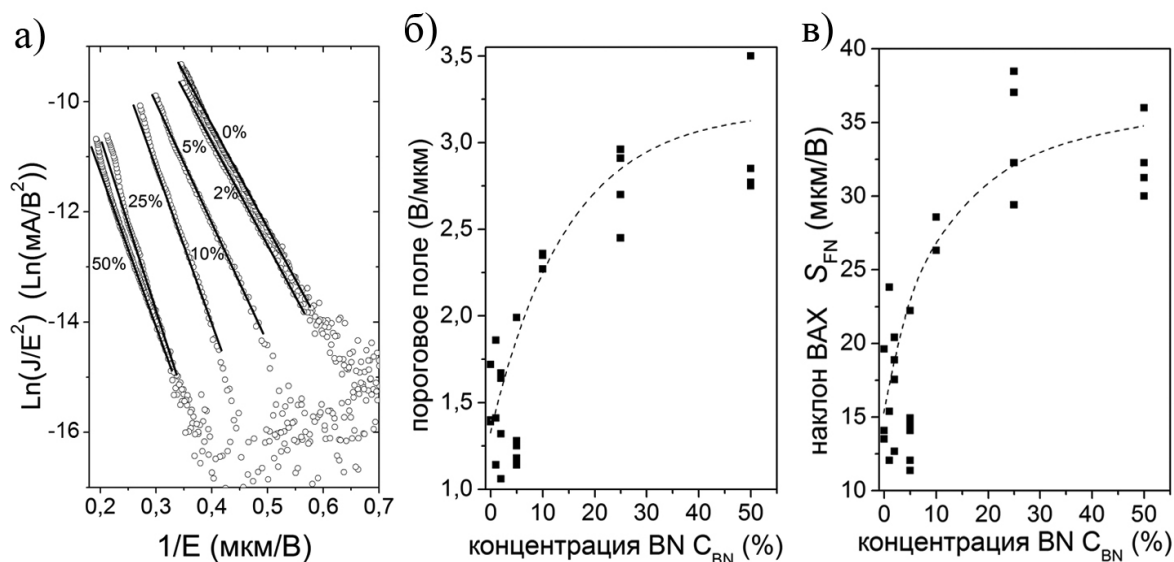
материалами. Для объяснения указанных различий было проведено моделирование распределения электрического поля в диоде с плоским анодом и катодом в виде массива одинаковых острых эмиттеров, ориентированных перпендикулярно подложке. Были рассмотрены две модели эмиттера в виде цилиндра и прямоугольного параллелепипеда. Было показано, что коэффициент усиления поля  $\beta$  для цилиндра (высотой  $h$  и радиусом  $r$ ) на его верхнем основании приблизительно определяется формулой  $\beta \approx 0,5 h/r$ . В случае параллелепипеда (высотой  $h$  и толщиной  $2r$ ) усиление поля максимально в области ближайших к аноду вершин и описывается формулой  $\beta \approx 0,25 h/r$ . Усиление поля на верхней грани параллелепипеда определяется его протяженностью, и в предельном случае бесконечной длины определяется формулой  $\beta \approx 0,04 h/r$ . Используя данные формулы, на основе анализа электронных микрофотографий исследованных материалов (Рис. 1-4) были получены оценки для коэффициентов усиления поля  $\beta$ , приведенные в Таблице 1. Для нанотрубок и нановолокон использовалось приближение цилиндров, для наночешуек – приближение параллелепипедов. Данные оценки свидетельствуют о том, что низкие пороги включения эмиссии для нанотрубок можно объяснить более высоким значением геометрического коэффициента усиления. Тем не менее, более чем трехкратное различие в пороговом поле, наблюдаемое между НГ пленкой и нановолокнами, невозможно объяснить различием в их геометрии. Учитывая, что характерные значения работы выхода для всех материалов близки [2] (см. Таблицу 1), можно сделать вывод о том, что в нанографитных кристаллитах реализуется особый низковольтный характер туннелирования, механизм которого отличен от обычного, описываемого теорией ФН. Одной из возможных причин возникновения низковольтного туннелирования может являться снижение работы выхода электрона за счет эффекта размерного квантования, который может наблюдаться для наноразмерных кристаллитов [3]. Размерный эффект для нанографитных кристаллитов может иметь место в области изгибов атомных слоев на краях кристаллитов, что отчетливо наблюдается на ПЭМ изображениях высокого разрешения (см. Рис. 1б). В области такого изгиба, электронные свойства и, в частности, работа выхода материала могут сильно отличаться от обычного графита, как это было показано в работе [4].

Для объяснения наблюдаемой максимальной плотности тока, был проведен расчет распределения поля в диоде с многоэмиттерным катодом, в зависимости от формы эмиттеров и расстояния между ними. Было установлено, что оптимальное расстояние между отдельными эмиттерами, при котором общая плотность тока с катода максимальна, для модели цилиндрических эмиттеров составляет  $2h$ , а для эмиттеров в форме параллелепипедов порядка  $5h$ . Было показано, что максимальная плотность тока  $J_{\max}$ , получаемая с катода при оптимальном расположении эмиттеров, определяется максимальной плотностью тока, возможной для отдельного эмиттера  $j_{\max}$ , и может быть оценена по формуле  $J_{\max} = j_{\max} \beta^2$ . Оценки, проведенные с использованием параметров эмиттеров, полученных с помощью методики SAFEM, а также анализ литературных данных, показывают, что для наноуглеродных эмиттеров

$j_{\max}$  составляет порядка  $10^5$  А/см<sup>2</sup>. Учитывая, что характерные для многоэмиттерных катодов из наноматериалов значения усиления поля лежат в области  $100 < \beta < 1000$ , предельный ток для них составляет  $1 \text{ А/см}^2 < j_{\max} < 10 \text{ А/см}^2$ . Таким образом, полученное значение  $J_{\max} = 1 \text{ А/см}^2$  для НГ пленки близко к предельному значению возможному для автокатодов такого типа.

Во *втором параграфе* третьей главы описаны результаты исследования автоэлектронной эмиссии из одностенных нанотрубок, синтезированных из смеси графита (С) и нитрида бора (BN) методом дугового разряда. Целью экспериментов по синтезу была попытка внедрения кластеров гексагонального нитрида бора в стенки одностенных углеродных нанотрубок. В результате предполагалось достичь контролируемых изменений в электронных свойствах нанотрубок (работы выхода, ширины запрещенной зоны и др.), которые могли приводить, в том числе, и к изменениям их автоэмиссионных характеристик.

Исследовались порошковые материалы, полученные в результате дугового синтеза из смесей С:BN, с содержанием BN в исходной смеси от 0 до 50%. Для катодов, сформированных из данных материалов, были проведены измерения ВАХ. На Рис. 5а приведены зависимости плотности тока  $J$  от напряженности поля  $E$  в координатах Фаулера-Нордгейма (ФН) в виде зависимости величины  $\ln(J/E^2)$  от  $1/E$ . Выявлено монотонное увеличение тангенса угла наклона  $J$ - $E$  зависимости в координатах ФН и порогового поля (Рис. 5б, в) при увеличении концентрации BN. Данные зависимости можно объяснить в предположении изменения геометрических или электронных свойств нанотрубок при увеличении концентрации нитрида бора, а именно, уменьшения коэффициента усиления поля  $\beta$  в два раза, или увеличения работы выхода от 5эВ до 8эВ.

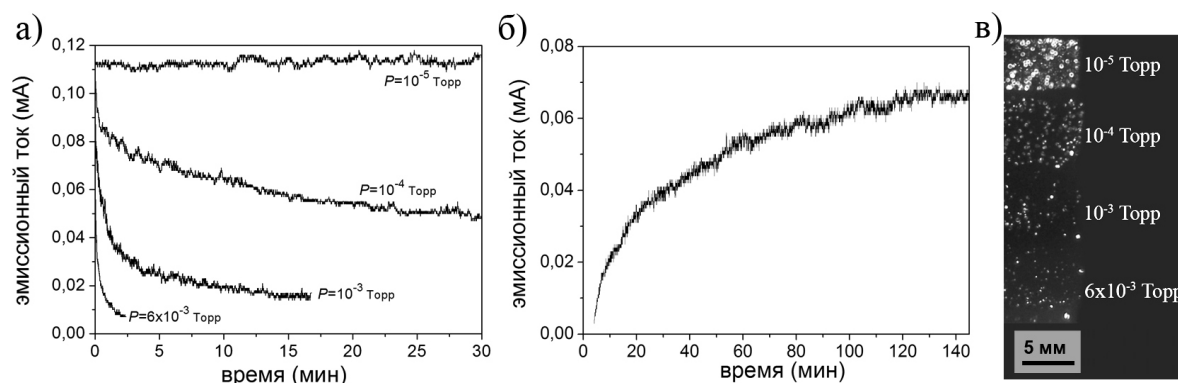


**Рис. 5.** (а) Зависимости плотности тока  $J$  от напряженности поля  $E$  в координатах ФН для автокатодов соответствующих различной концентрации BN. Сплошные линии – аппроксимация линейных участков зависимостей. (б) Зависимость порогового поля (для плотности тока  $10 \text{ мкА/см}^2$ ) и (в) тангенса угла наклона  $J$ - $E$  зависимости в координатах ФН от концентрации BN.

Для исследования геометрии нанотрубок полученные материалы были охарактеризованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Анализ электронных снимков показал, что, с одной стороны, наблюдается уменьшение средней длины нанотрубок (уменьшение  $\beta$ ), а с другой - уменьшение среднего диаметра нанотрубок и их количества в пучках (увеличение  $\beta$ ). На основании полученных экспериментальных данных сделан вывод о том, что модификация геометрии нанотрубок не позволяет объяснить наблюдаемое изменение параметров катодов.

Альтернативным механизмом может быть изменение работы выхода, вызванное встраиванием VN кластеров в стенки углеродных нанотрубок. В результате встраивания VN кластеров, может изменяться электронная структура нанотрубок, в частности, увеличиваться ширина запрещенной зоны, вследствие чего электрическое поле будет проникать в нанотрубку на большую глубину. Это приведет к уменьшению напряженности поля на ее окончании, при этом эффективная работа выхода увеличится. В случае многостенных нанотрубок из нитрида бора эффективная работа выхода оказывается более 10 эВ [7]. В нашем случае (когда только часть углеродного материала замещена нитридом бора), по-видимому, реализуется промежуточный случай значений работы выхода (7-8 эВ). Таким образом, проведенные исследования АЭ свойств могут служить косвенным свидетельством встраивания VN в стенки углеродных нанотрубок.

В *третьем параграфе* представлены результаты исследования зависимости автоэмиссионных характеристик нанографитных пленок от величины давления остаточных газов. Было обнаружено, что АЭ свойства нанографитных катодов остаются стабильными в течение длительного времени при уровне вакуума выше  $10^{-5}$  Торр. При давлении, превышающем  $10^{-5}$  Торр, при приложении постоянного напряжения наблюдалось уменьшение автоэмиссионного тока со временем (Рис. 6а). Скорость падения уровня тока увеличивалась с увеличением давления, при этом падение происходило до некоторого равновесного значения, в зависимости от уровня вакуума.



**Рис. 6.** (а) Зависимость автоэмиссионного тока от времени при различных уровнях давления. (б) Зависимость автоэмиссионного тока от времени при  $P=10^{-5}$  Торр после выдержки при  $P=6 \times 10^{-3}$  Торр. (в) Эмиссионная картина для НГ катодов, выдержанных под напряжением при различных уровнях давления.

Зависимость автоэмиссионного тока при деградации имела два характерных участка, которые наилучшим образом описывались суммой двух экспоненциальных зависимостей:  $I(t)=I_0+I_1e^{-t/T_1}+I_2e^{-t/T_2}$ . При этом отношение  $T_1/T_2$  для всех катодов, независимо от начального значения тока и уровня давления, изменялось незначительно, в пределах  $T_1/T_2=10-50$ .

После достижения равновесного значения эмиссионного тока, уровень давления вновь устанавливался равным начальному значению около  $10^{-5}$  Торр. При этом со временем происходило частичное восстановление уровня автоэмиссионного тока (Рис. 6б). Процесс восстановления хорошо описывался одной экспоненциальной зависимостью  $I(t)=I_0-I_3e^{-t/T_3}$ . На Рис. 6в приведены эмиссионные картины четырех катодов (зарегистрированные при одинаковом расстоянии катод-анод), полученные при  $10^{-6}$  Торр, которые были выдержаны под напряжением при различном уровне давления. Видно, что количество эмиссионных центров и их интенсивность значительно ниже для катодов, выдержанных при больших значениях давления.

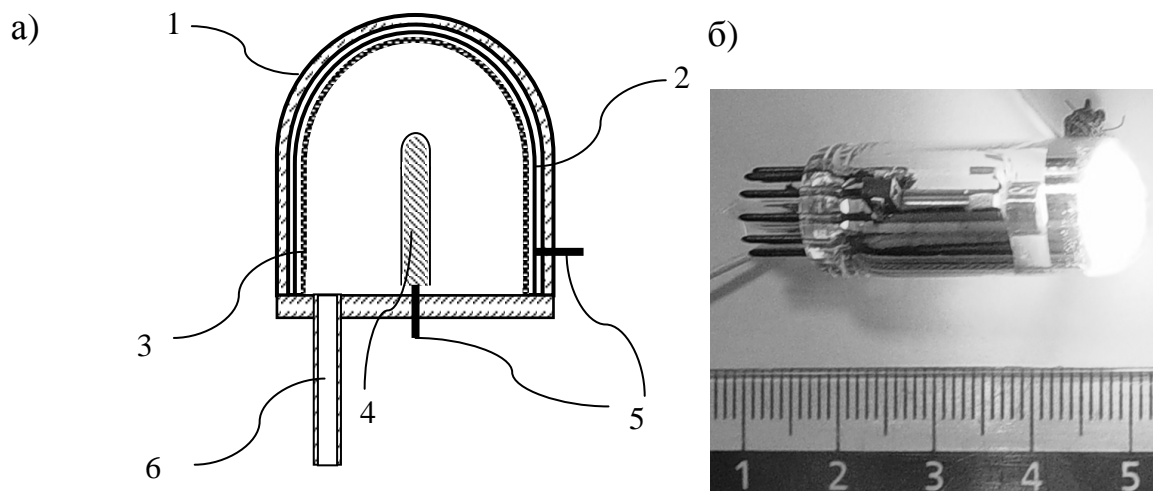
Таким образом, при уровне давления более  $10^{-5}$  Торр наблюдаются как обратимые, так и необратимые изменения автоэмиссионных характеристик НГ катодов со временем. Обратимые изменения и восстановление эмиссионной способности, вероятно, связаны с процессом десорбции атомов и молекул (например, молекул кислорода) [6], которые могут ухудшать эмиссионные свойства. Необратимая деградация эмиссионных характеристик может быть связана с частичным разрушением материала катода под действием бомбардировки катода высокоэнергетичными ионами остаточного газа [6]. Необратимая деградация отдельных эмиттеров может также являться следствием разогрева эмиссионным током.

В импульсном режиме напряжения (с длительностью импульсов 0,1мс) при малой частоте следования импульсов (1-10 Гц) автоэмиссионные характеристики практически не изменяются вплоть до давлений  $10^{-2}$  Торр. При увеличении частоты следования до 100-200 Гц получаемые зависимости оказываются аналогичными случаю постоянного тока. При уровне вакуума более  $3 \times 10^{-2}$  Торр существенный вклад в измеряемый ток начинает оказывать ионный ток, возникающий в результате ионизации остаточного газа эмитированными электронами.

Результаты экспериментальных исследований характеристик нанокатодов показывают, что они могут быть использованы в качестве эффективных источников электронов в устройствах вакуумной электроники. В данной работе был разработан новый тип вакуумной диодной катодолюминесцентной лампы с нанокатодом, представленный в *четвертом параграфе*. Особенность конструкции лампы состоит в том, что анод и катод имеют форму соединенных в единое целое цилиндра и полусферы (см. Рис. 7а). Данная конструкция позволяет устранить некоторые недостатки аналогичных ламп цилиндрической и сферической конфигурации при одновременном увеличении общей энергетической эффективности источника света, упрощении его конструкции и процедуры изготовления. На Рис. 7б представлено изображение прототипа лампы в



рабочем режиме, демонстрирующее равномерность свечения люминофора. Были достигнуты значения яркости  $6 \times 10^4$  кд/м<sup>2</sup>, близкие к лучшим значениям для ламп других типов.

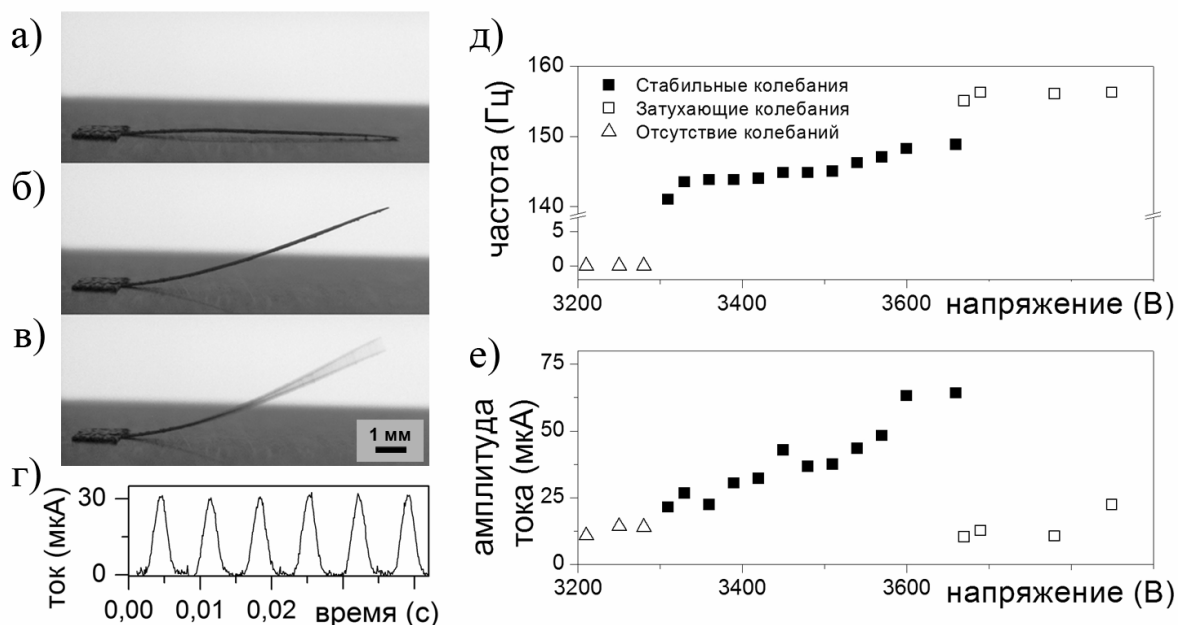


**Рис. 7. (а)** Схема конструкции катодолуминесцентной лампы.

1 – стеклянная колба, 2 – анод в виде прозрачной электропроводящей пленки из смеси оксидов олова и индия (ИТО), 3 – слой катодолуминофора, 4 – нанокуглеродный автокатод, 5 – электроды, 6 – стеклянная трубка для откачки лампы. (б) Прототип диодной катодолуминесцентной лампы.

**Четвертая глава** диссертации посвящена результатам исследования электромеханических явлений, возникающих при наблюдении автоэлектронной эмиссии из катодов, обладающих свойством механической упругости. В *первом параграфе* описан новый обнаруженный эффект возбуждения электромеханических автоколебаний, возникающих при приложении постоянного напряжения к вакуумному диоду с катодом, изготовленным из гибкой упругой мембраны из одностенных углеродных нанотрубок. В качестве эмиттера использовалась полоска такой мембраны шириной в пределах 0,1-3 мм и длиной 5-20 мм. Полоска закреплялась на стальной подложке за один из концов с помощью графитного скотча (Рис. 8а) и помещалась в вакуумную камеру в качестве катода напротив плоского стального анода. При приложении напряжения между электродами свободный конец полоски изгибался под действием электростатической силы в направлении анода (Рис. 8б). При достижении порогового значения напряжения возникал автоэмиссионный ток. При этом, несмотря на постоянное приложенное напряжение, в некоторых случаях наблюдались стабильные механические колебания свободного конца эмиттера (Рис. 8в) и колебания величины автоэмиссионного тока на частотах в диапазоне 100-300 Гц. Значение частоты определялось геометрическими размерами исследованных образцов. Типичный вид зависимости тока автоэмиссии от времени показан на Рис. 8г и имеет характерную форму негармонических периодических колебаний. С увеличением напряжения частота и амплитуда колебаний возрастали (Рис. 8д, е). При этом после достижения некоторого предельного значения напряжения колебания становились нестабильными и практически исчезали. Для менее упругих

эмиттеров (более коротких отрезков мембраны), колебания наблюдались при больших значениях тока и имели форму биений и нарастающих колебаний. Эмиттеры с наименьшей упругостью отклонялись в постоянном поле без возникновения заметных колебаний. При этом наблюдался резистивный нагрев окончания эмиттера, который сопровождался свечением и разрушением материала эмиттера.

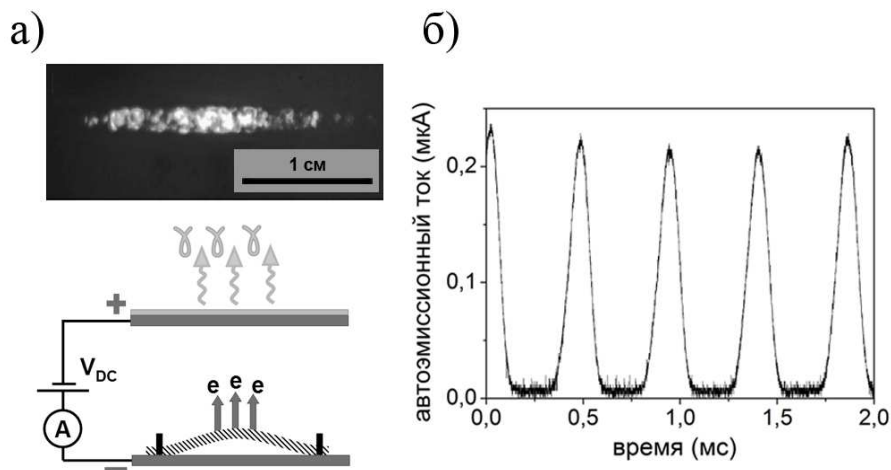


**Рис. 8.** (а) Изображение автоэлектронного эмиттера из ОУНТ-мембраны в отсутствие электрического поля; (б) в постоянном электрическом поле ниже порога возникновения тока; (в) в постоянном электрическом поле при наличии автоэмиссионного тока в колебательном режиме. (г) Зависимость тока от времени в колебательном режиме. Зависимость частоты (д) и амплитуды тока (е) от приложенного напряжения.

При приложении напряжения в виде пилообразных импульсов, вид и частота следования импульсов автоэмиссионного тока определялись соотношением частоты импульсов напряжения  $f_{\text{возб}}$  и частоты собственных механических колебаний  $f_{\text{собств}}$ . При  $f_{\text{возб}} > f_{\text{собств}}$  наблюдались биения в зависимости тока от времени. При  $f_{\text{возб}} < f_{\text{собств}}$  за время одного импульса напряжения наблюдалось несколько импульсов автоэмиссионного тока. При этом вольтамперная характеристика диода в данном режиме была немонотонна и имела участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Для определения механических колебательных характеристик исследованной системы между электродами прикладывалось импульсное напряжение обратной полярности. При этом наблюдались резонансные колебания на собственных частотах. По зависимости амплитуды резонансных колебаний от частоты прикладываемого напряжения было определено характерное значение добротности системы ( $Q \sim 10$ ). Было установлено, что колебания тока в постоянном поле при его полярности, соответствующей получению автоэмиссии, происходят на частотах, близких к собственным.

Эффект возбуждения стабильных электромеханических колебаний в постоянном поле наблюдался и при другой геометрии эксперимента, когда гибкий упругий эмиттер закреплялся с двух концов на подложке параллельно плоскому аноду, и эмиссия наблюдалась с его боковой поверхности. В качестве эмиттеров в данном случае использовались волокна, свитые из многостенных углеродных нанотрубок. Волокна длиной 1-2 см и диаметром 5-20 мкм закреплялись на стальных подложках с помощью проводящей серебряной пасты и помещались в вакуумную камеру в качестве катодов напротив анода, изготовленного в виде плоского люминофороного экрана (Рис. 9а).



**Рис. 9.** (а) Схема измерения автоэмиссии с боковой поверхности МУНТ волокна. (б) Зависимость эмиссионного тока от времени в колебательном режиме.

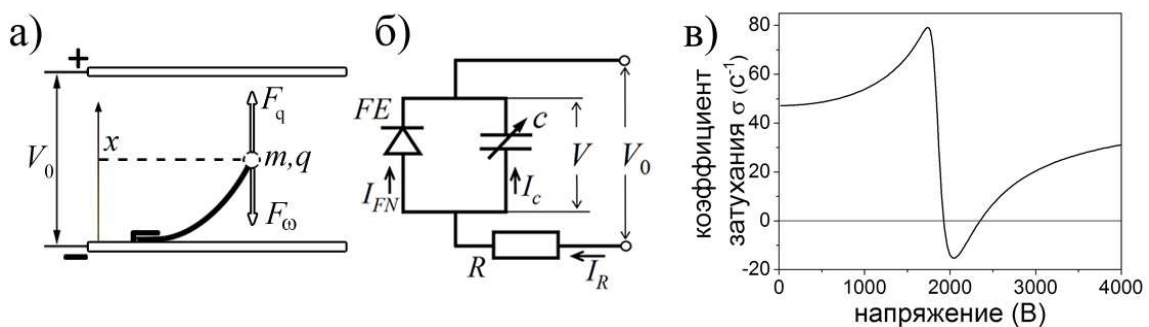
При приложении напряжения возникал автоэмиссионный ток с боковой поверхности волокна, и эмиссионная картина на экране была ярче в центре, что происходило за счет изгиба волокна под действием поля. При этом автоэмиссионный ток вновь имел характерную периодическую зависимость во времени, с частотой порядка нескольких килогерц (Рис. 9б). Таким образом, в рассмотренных системах наблюдается эффект возникновения электромеханических автоколебаний, то есть стабильных незатухающих колебаний, возникающих при постоянном внешнем воздействии (постоянном поле) в диссипативной системе. Общими условиями для данных наблюдений являются наличие упругих свойств эмиттеров и их наноразмерность, благодаря которой эффективная автоэмиссия наблюдается при относительно невысоких напряжениях.

Во *втором параграфе* данной главы указанные результаты экспериментальных наблюдений были использованы при построении модели колебательной системы, представленной на Рис. 10. Для описания общих свойств автоколебаний была рассмотрена одномерная задача движения материальной точки в электрическом поле. Механическое движение эмиттера определялось силой упругости  $F_{\omega}$ , силой внутреннего трения  $F_{\nu}$  и электростатической силой  $F_q$ , действующей на заряд  $q$ , индуцированный на

эмиттере под действием приложенного к электродам напряжения  $V_0$ . В первом приближении механические свойства эмиттера описывались законом Гука  $F_\omega = -m\omega_0^2 x$  и линейной по скорости силой трения  $F_v = -m(\omega_0/Q)\dot{x}$ , где  $\omega_0$  – собственная частота и  $Q$  – добротность осциллятора. Электростатическая сила определялась как  $F_q = qE$ , где  $E$  – напряженность электрического поля на поверхности эмиттера, которая считалась линейной по координате  $x$ . Электрическая часть системы была представлена в виде эквивалентной схемы (Рис. 10б), содержащей источник напряжения, подключенный к сопротивлению  $R$ , емкости  $c$  и диоду с вольтамперной характеристикой, определяемой формулой ФН. Электромеханические процессы в данной модели описывались системой уравнений, состоящей из второго закона Ньютона и правил Кирхгофа:

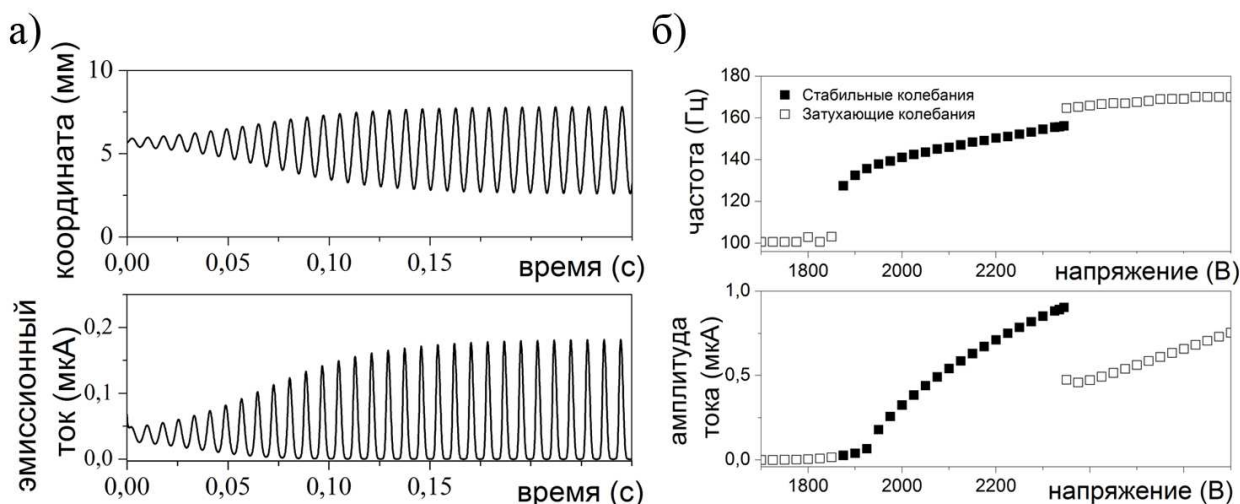
$$\begin{cases} m\ddot{X} = F_\omega + F_v + F_q \\ V_0 = I_R R + V \\ I_R = I_{FN} + I_c \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ddot{X} + (\omega_0 / Q)\dot{X} + \omega_0^2 X - c(X)E(X, V)Vm^{-1} = 0 \\ c(X)\dot{V} + V\dot{c}(X) + I_{FN}(E(X, V)) + (V - V_0)R^{-1} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений была проанализирована аналитически. Были рассмотрены малые колебания координаты  $x(t) = e^{-\sigma t} \sin(\omega t)$  около положения равновесия и получена система алгебраических уравнений относительно коэффициента затухания  $\sigma$  и частоты  $\omega$ . Было показано, что при определенном выборе параметров в данной системе существует область напряжений  $V_0$ , в которой коэффициент затухания  $\sigma$  является отрицательным, и колебания оказываются нарастающими (Рис. 10в). Для определения возможности стабилизации нарастающих колебаний было проведено численное решение системы (1) при параметрах, соответствующих эксперименту с пленками из нанотрубок.



**Рис. 10** (а) Механическая часть модели гибкого эмиттера. (б) Эквивалентная схема электрической части системы. (в) Теоретическая зависимость коэффициента затухания  $\sigma$  от приложенного напряжения.

Было показано, что в области напряжений, соответствующих отрицательному коэффициенту затухания, решение системы представляет собой стабильные колебания координаты и эмиссионного тока (Рис. 11а). Вычисленные зависимости частоты и амплитуды автоколебаний (Рис. 11б) от приложенного напряжения качественно хорошо воспроизводят зависимости, наблюдаемые в эксперименте (см. Рис. 8д, е).



**Рис. 11 (а)** Зависимости координаты и автоэмиссионного тока от времени в режиме автоколебаний и **(б)** зависимости частоты и амплитуды колебаний тока от приложенного напряжения, полученные в результате численных расчетов.

Предложенная модель справедлива для автоэммиттеров любого типа. Однако практическая реализация описанного автоколебательного режима возможна только при сочетании необходимых механических (упругость, гибкость) и эмиссионных (низкие пороговые напряжения) характеристик, имеющих место в случае углеродных нанотрубок и некоторых других наноразмерных материалов. В случае макроскопического эмиттера на основе мембраны из нанотрубок, были получены частоты порядка 100 Гц. По порядку величины частота обратно пропорциональна характерному размеру системы  $L$ . Считая, что характерный размер эмиттера на основе ОУНТ мембраны  $L=1$  мм, можно оценить ожидаемое значение частоты автоколебаний для случая наноразмерного эмиттера (например, в виде отдельной нанотрубки), для которого  $L=1$  нм, как  $f_{\text{nano}}=100 \text{ Гц} \times 1 \text{ мм} / 1 \text{ нм} = 10^8 \text{ Гц}$ . Это значение совпадает по порядку величины с собственными частотами нанотрубок, получаемыми в эксперименте. При такой частоте автоколебаний электромеханическая система на основе полевого эмиттера должна излучать высокочастотные электромагнитные волны. В связи с этим данное явление может быть использовано для создания наноэлектромеханических устройств нового типа, способных генерировать электромагнитные волны.

### III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследована низкополевая эмиссия электронов из автокатодов на основе наноуглерода (нанотрубки и графит) и нановолокон оксидов металлов ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{ZnO}$ ). Показано, что наноуглеродные автокатоде обеспечивают заметно более низкие пороговые поля эмиссии и более высокие значения максимальной плотности тока, чем автокатоде из оксидов металлов. На основании компьютерного моделирования проведены оценки геометрического коэффициента усиления поля для указанных материалов, которые свидетельствуют о наличии отличного от предсказываемого теорией Фаулера-Нордгейма низковольтного механизма эмиссии для графитных катодов. Определены максимальные плотности тока, возможные для различных автокатодов на основе наноматериалов, и показано, что экспериментально полученные плотности тока для графитных катодов ( $1 \text{ A/cm}^2$ ) близки к предельным значениям.
2. Выявлены особенности низкополевой эмиссии электронов из автокатодов, на основе гетерофазных нанотрубок, синтезированных из смеси углерода и нитрида бора. Обнаружена корреляция параметров автоэмиссии с процентным содержанием BN-компоненты в смеси. Показано, что экспериментально наблюдаемые изменения эмиссионных характеристик могут быть объяснены увеличением эффективной работы выхода электронов вследствие встраивания нитрида бора в стенки углеродных нанотрубок.
3. Определена зависимость параметров графитных автокатодов от уровня давления остаточных газов. Показано, что автоэмиссионные свойства графитных катодов остаются стабильными в течение длительного времени при уровне давления остаточных газов ниже  $10^{-5}$  Торр. При увеличении давления до  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  Торр наблюдается снижение эмиссионной способности, которая частично восстанавливается при улучшении вакуума до  $10^{-5}$  Торр. Показано, что при давлении остаточных газов более  $3 \times 10^{-2}$  Торр существенный вклад в измеряемый ток дает ионный ток, возникающий в результате ионизации остаточного газа эмитированными электронами.
4. Обнаружен эффект возникновения электромеханических автоколебаний в процессе низкополевой электронной эмиссии в системе, представляющей собой вакуумный диод с автокатодом, обладающим упругими свойствами. Указанные автоколебания были зарегистрированы экспериментально в системах с наноуглеродными автокатадами. Определена взаимосвязь параметров возбуждаемых автоколебаний с геометрическими и упругими характеристиками автокатодов и условиями эксперимента. Построена эмпирическая модель, на основании которой проведены расчеты, позволяющие качественно объяснить причины возникновения указанных автоколебаний.

### Цитируемая литература

1. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 4. – С. 401-438.
2. *Fang X., Yoshio B., Gautam U., Ye Ch., Golberg D.* Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission applications // J. Mater. Chem. – 2008. – V. 18. – P. 509-522.
3. *Frolov V.D., Karabutov A.V., Pimenov S.M., Konov V.I., Ageev V.P.* Similarity in field electron emission from nanocrystalline diamond and related materials // Diamond Rel. Mat. – 2001. – V. 10. – P. 1719-1726.
4. *Захидов Ал. А., Образцов А.Н., Волков А.П., Ляшенко Д.А.* Механизм низковольтной эмиссии электронов из наноуглеродных материалов // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127. – № 1. – С. 100-106.
5. *Saito Y., Seko K., Kinoshita J.* Dynamic behavior of carbon nanotube field emitters observed by in situ transmission electron microscopy // Diamond Rel. Mat. – 2005. – V. 14. – P. 1843-1947.
6. *Елинсон М.И., Васильев Г.Ф.* Автоэлектронная эмиссия / Под ред. Зернова Д.В. – М.: Физматгиз, – 1958. – 272 С.
7. *Cumings J., Zettl A.* Field emission and current-voltage properties of boron nitride nanotubes // Solid State Comm. – 2004. – V. 129. – P. 661-664.

### Список публикаций по теме диссертации

1. *Zakhidov Al.A., Nanjundaswamy R., Obraztsov A.N., Zhang M., Fang S., Kleshch V.I., Vaughan R.H., Zakhidov A.A.* Field emission of electrons by carbon nanotube twist-yarns // Appl. Phys. A. – 2007. – V. 88. – P. 593-600.
2. *Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D.* Modeling of field emission from nanocarbons // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostruct. – 2008. – V. 16. – № 5. – P. 384-388.
3. *Kleshch V.I., Obraztsova E.D., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsov A.N.* Field emission from single-wall nanotubes obtained from carbon and boron nitride mixtures // Phys. stat. sol. (b). – 2008. – V. 245. – № 10. – P. 1990-1993.
4. *Rackauskas S., Nasibulin A.G., Jiang H., Tian Y., Kleshch V.I., Sainio J., Obraztsova E.D., Bokova S.N., Obraztsov A.N., Kauppinen E.I.* A novel method for metal oxide nanowire synthesis // Nanotechnology. – 2009. – V. 20. – P. 165603-165611.
5. *Obraztsov A.N., Kleshch V.I.* Cold and Laser Stimulated Electron Emission from Nanocarbons // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2009. – V. 4. – P. 207-219.
6. *Kleshch V.I., Zakhidov Al.A., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D., Vaughan R.H.* Self-oscillations of carbon nanotube twist-yarn during field emission // Phys. stat. sol. (b). – 2009. – V. 246. – № 12. – P. 2658-2661.
7. *Клец В.И., Образцов А.Н., Образцова Е.Д.* Автоколебания в электромеханической системе с полевым эмиттером // Письма ЖЭТФ. – 2009. – V. 90. – № 6. – P. 510-514.

8. **Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Obraztsova E.D.** Modeling of field emission from nanocarbons // Abstracts Book of 8th Biennial International Workshop «Fullerenes and Atomic Clusters IWFAC'2007», St Petersburg (Russia), July 2-6. – 2007. – P. 59.
9. **Svirko Y.P., Lyashenko D.A., Obraztsova E.D., Kleshch V.I., Obraztsov A.N.** Femtosecond laser-assisted electron emission from CVD nano-graphite films // Abstracts Book of the 2<sup>nd</sup> International conference on surfaces 2007, Alvor (Portugal), 9-11 July. – 2007. – P. 28.
10. **Obraztsov A.N., Zakhidov Al.A., Kleshch V.I., Volkov A.P., Lyashenko D.A., Svirko Yu.P.** Comparative study of electron field emission and optical rectification effects in nanocrystalline graphite and carbon nanotubes // 4<sup>th</sup> Russian-French workshop on Nanosciences and Nanotechnologies 2007, Aufrance (France), 10-12 October. – 2007. – P. 21.
11. **Kleshch V.I., Obraztsova E.D., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsov A.N.** Field emission properties of single-wall nanotubes synthesized from C:BN mixtures // Abstracts Book of GDR annual meeting «Science and application of nanotubes 2007», Aufrance (France), October 15-19. – 2007. – P. IX-11.
12. **Obraztsov A.N., Kleshch V.I., Svirko Yu.P., Lyashenko D.A., Volkov A.P.** Electron emission of nanographite CVD films: properties and applications // Abstract Book of 2<sup>nd</sup> Int. Meeting on Developments in Materials, Processes and Applications of Nanotechnology 2008, Cambridge (UK), January 6-8. – 2008. – P.184.
13. **Kleshch V.I., Obraztsova E.D., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Obraztsov A.N.** Field emission from single-wall carbon nanotubes synthesized from C:BN mixtures // Abstracts Book of International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2008, Kirchberg (Austria), March 1-8. – 2008. – P. 90.
14. **Kleshch V.I., Obraztsov A.N.** Computer modeling of field emission from nanocarbons // Proceedings of the International Workshop «Nanocarbon Photonics and Optoelectronics 2008», Polvijärvi (Finland), August 3-9. – 2008. – P. 31.
15. **Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Zakhidov Al.A., Obraztsova E.D.** Parametric oscillator behavior of nanosized field emitters // Book of Abstracts of 5<sup>th</sup> Bilateral Russian-French Workshop on Nanoscience and Nanotechnologies 2008, Moscow (Russia), December 1-2. – 2008. – P. 14.
16. **Клеуц В.И., Образцов А.Н., Захидов Ал.А., Образцова Е.Д., Насибуллин А., Раскаукас С., Кауппинен Э.** Автоэлектронные эмиттеры для наноэлектромеханических устройств // Первый Международный форум по нанотехнологиям 2008, Москва (Россия), 3-5 декабря. – 2008. – С. 454-455.
17. **Kleshch V.I., Obraztsov A.N., Zakhidov Al.A., Obraztsova E.D.** Electromechanical self-sustained oscillations of nanosized field emitters // Abstracts Book of International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials 2009, Kirchberg (Austria), March 7-14. – 2009. – P. 94.
18. **Клеуц В.И., Образцов А.Н., Образцова Е.Д.** Перспективы создания наноэлектромеханических устройств на основе явления автоколебаний в системе полевых наноэмиттеров // Второй Международный форум по нанотехнологиям 2009, Москва (Россия), 6-8 октября. – 2009. – С. 167-168.
19. **Образцов А.Н., Клеуц В.И.** // Катодолюминесцентная диодная лампа. Патент РФ по заявке №2008141395/09(053681) от 21.10.2008.