

На правах рукописи



Тарадаев Евгений Петрович

**Многоострийные полевые эмиттеры для  
высоковольтных электронных устройств**

01.04.04 – Физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: ***Соминский Геннадий Гиршевич***  
профессор,

доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: ***Баскин Лев Мордухович***

доктор физико-математических наук,

профессор, заведующий кафедрой высшей математики ФГАОУ ВО «СПбГУТ»

***Павлов Виктор Георгиевич***

доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник, Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «22» июня 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенном по адресу: Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29, четвёртый учебный корпус, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.229.01,  
*доктор технических наук,*  
*профессор*



*Коротков Александр Станиславович*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Применение полевых эмиттеров представляется перспективным для создания систем формирования электронных потоков во многих устройствах вакуумной электроники. Преимущества полевых эмиттеров перед термокатадами очевидны, так как они не требуют накала и безинерционны. Миниатюрные, например, одноострийные с субмикронной вершиной полевые эмиттеры могут обеспечить чрезвычайно большие плотности токов эмиссии (порядка или даже более  $10^7$  А/см<sup>2</sup>), однако, как правило, не выдерживают отбора токов более 100 - 200 мкА.

До недавнего времени полевые эмиттеры использовались преимущественно в сверхвысоковакуумных, низкоточных и низковольтных устройствах. Между тем, существуют и привлекают к себе все больший интерес миниатюрные, но высоковольтные электронные приборы, где трудно использовать накаливаемые термокатоды. К таковым можно отнести, например, электронно-лучевые СВЧ устройства коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, а также портативные и мобильные источники рентгеновского излучения, работающие при ускоряющих электронах напряжениях единицы - десятки киловольт. В указанных приложениях требуются электронные токи порядка или более нескольких десятков миллиампер, причем при достаточно больших плотностях токов порядка или более  $\sim 100 - 150$  мА/см<sup>2</sup>.

Применению полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах препятствуют не только трудности получения достаточно больших токов, но также и невысокая их долговечность. Существующие полевые эмиттеры не могут стабильно работать в условиях технического вакуума ( $10^{-7} - 10^{-8}$  Торр), характерных для высоковольтных электронных приборов. Основные механизмы их разрушения связаны с интенсивной бомбардировкой катода ионами остаточных газов, типичной для таких приборов, с воздействием больших в сильных электрических полях пондеромоторных сил и/или с тепловыми эффектами при отборе больших токов эмиссии. Использование в качестве полевых эмиттеров распределенных многоострийных систем позволяет облегчить токовую нагрузку на отдельное острие и минимизировать влияние пондеромоторных сил, а также тепловые эффекты. Однако действие ионной бомбардировки принципиально ограничивает возможности использования полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах.

К настоящему времени разработаны технологии изготовления многоострийных структур, которые могут быть использованы для создания полевых эмиттеров. Лучшие образцы многоострийных катодов позволяют получать токи полевой эмиссии в десятки миллиампер (см., например, [1, 2]). Однако до сих пор не доказана возможность стабильной работы существующих многоострийных полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах при отборе с их поверхности больших токов. Надежды по созданию полевых эмиттеров, стойких к воздействию ионной бомбардировки, исследователи связывали ранее с применением для их изготовления разнообразных углеродных и содержащих углерод материалов (см., например, [2, 3]). Но такие надежды не оправдались, так как все существующие материалы расплываются при бомбардировке быстрыми ионами. Предпринимались попытки использования специальных электронно-оптических систем, препятствующих попаданию на полевой эмит-

тер ионов из пространства формирования и транспортировки электронных потоков. Однако созданные электронно-оптические системы (см., например, [1,4]), позволяли лишь уменьшить интенсивность ионной бомбардировки эмиттера, но не исключали его распыление.

Принципиально другое и весьма перспективное решение по защите полевых эмиттеров от разрушающего действия ионной бомбардировки было предложено в лаборатории Сильноточной и СВЧ электроники СПбПУ. В выполненных исследованиях одноострийных полевых эмиттеров из вольфрама [5] было показано, что эффективная защита таких эмиттеров от воздействия ионной бомбардировки может быть обеспечена с помощью покрытий из молекул фуллерена  $C_{60}$ , активированных потоком медленных ( $\sim 40$  эВ) ионов калия. Однако ко времени начала работ по теме данной диссертации отсутствовали данные, позволяющие определить возможности создания и использования фуллереновых покрытий для защиты от разрушающего действия ионной бомбардировки многоострийных полевых эмиттеров, изготовленных из других материалов.

Известные к настоящему времени многоострийные структуры, пригодные для создания полевых эмиттеров, изготавливаются обычно из молибдена, углеродных нанотрубок и других содержащих углерод материалов, а также из разного типа полупроводников. Технологии создания большинства существующих многоострийных структур чрезвычайно сложны. Наиболее хорошо отработана и достаточно проста технология создания многоострийных структур (МКС) из кремния [6]. По этой причине кремниевые структуры наиболее привлекательны для использования при создании полевых эмиттеров. МКС могут быть пригодны для использования в качестве полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах, если удастся решить две основные проблемы – обеспечить получение с их поверхности достаточных по величине токов и плотностей тока эмиссии и защитить эти структуры от разрушающего действия ионной бомбардировки. Возможность создания и использования фуллереновых покрытий для защиты МКС не очевидна и требует экспериментальной проверки. Экспериментальной проверки требует также возможность активирования фуллереновых покрытий на поверхности МКС в результате обработки этой поверхности потоком ионов калия.

Значительный интерес представляет, кроме того, рассмотрение возможностей создания многоострийных металлических структур с защитными покрытиями с использованием упрощенных технологий.

Учитывая выше сказанное представляется актуальной данная работа, посвященная созданию многоострийных полевых эмиттеров с защитными покрытиями для высоковольтных электронных устройств и определению закономерностей их работы при отборе больших токов в условиях технического вакуума.

### **Цели диссертационной работы.**

- Создание многоострийных кремниевых полевых эмиттеров с защитными покрытиями для высоковольтных электронных устройств и определение закономерностей их работы при отборе больших токов в условиях технического вакуума.
- Апробация возможности создания методами электроэрозионной обработки многоострийных молибденовых полевых эмиттеров и определение закономерностей их работы с защитными покрытиями при отборе больших токов в условиях технического вакуума.

### **Основные задачи работы.**

Для достижения указанных целей необходимо решить следующие задачи:

- Разработать метод создания содержащих фуллерены защитных покрытий на поверхности многоострийных кремниевых структур (МКС).
- Разработать методы активирования защитных покрытий МКС с помощью потока ионов калия.
- Изучить закономерности работы МКС с активированными и неактивированными покрытиями и на основе полученных данных определить воздействие процесса активирования на эмиссионные характеристики катодов.
- Изучить влияние на эмиссионные характеристики МКС морфологии их поверхности и на основе полученных данных выработать рекомендации по выбору оптимальной морфологии.
- Изучить закономерности функционирования МКС с защитными покрытиями в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме при отборе больших токов эмиссии, и на основе полученных данных оценить возможные механизмы разрушения многоострийных катодов.
- Определить возможности использования созданных МКС с защитными покрытиями в СВЧ приборах коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн, а также в портативных источниках рентгеновского излучения.
- Разработать методику создания многоострийных молибденовых структур (ММС) с помощью электроэрозионной обработки и определить эмиссионные характеристики этих структур с активированными фуллереновыми покрытиями при их работе в техническом вакууме.

### **Научная новизна диссертационной работы.**

Основные результаты работы получены впервые:

- 1) Разработаны металл-фуллереновые покрытия нового типа, включающие слой молибдена толщиной 5 - 20 нм на поверхности многоострийной кремниевой структуры (МКС) и нанесенный поверх молибдена слой молекул фуллерена  $C_{60}$  толщиной от 2 до 10 монослоёв. Созданные металл-фуллереновые покрытия обеспечивают повышенную проводимость МКС, защищают многоострийную структуру от разрушающего действия бомбардировки ионами остаточного газа и повышают ее прочность.
- 2) Разработаны методы активирования металл-фуллереновых покрытий МКС потоком медленных (40 эВ) ионов калия, позволяющие на 15 - 20% понизить рабочие напряжения, необходимые для получения фиксированных токов эмиссии.
- 3) Определено влияние на эмиссионные характеристики МКС с защитными покрытиями морфологии их поверхности. На основе полученных данных выработаны рекомендации по выбору оптимальной морфологии.
- 4) Получены данные о закономерностях функционирования МКС с защитными металл-фуллереновыми покрытиями в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме ( $\sim 10^{-7}$  Торр):
  - Продемонстрирована стабильная работа МКС с активированными покрытиями

при токах эмиссии ориентировочно до 30 - 40 мА и плотностях тока эмиссии приблизительно до  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>.

- Продемонстрирована стабильная работа МКС с неактивированными покрытиями при токах эмиссии ориентировочно до 100 мА и плотностях тока эмиссии приблизительно до  $\sim 0.4$  А/см<sup>2</sup>.
  - Определены предельные токовые нагрузки, которые выдерживает одиночное острие в МКС с металл-фуллереновым покрытием. После завершения длительной тренировки одиночные острия с радиусом вершины 20 - 40 нм не разрушаются при токе до 5 - 6 мкА.
- 5) Продемонстрирована возможность использования созданных МКС с металл-фуллереновыми покрытиями в диагностических гиротронах коротковолнового миллиметрового диапазона длин волн. Совместно с сотрудниками ИПФ РАН разработана концепция создания электронно-оптической системы с полевым эмиттером для формирования электронного пучка в гиротроне, пригодном для реализации диагностики методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с динамической поляризацией ядер (ДПЯ) в медицине и биологии.
- 6) Разработана достаточно простая методика создания многоострийных молибденовых структур (ММС) с помощью электроэрозионной обработки молибдена. Определены эмиссионные характеристики этих структур с активированными фуллереновыми покрытиями при их работе в техническом вакууме. Продемонстрирована перспективность использования ММС в миниатюрных электронных приборах.

### **Научная и практическая значимость работы.**

В диссертации разработаны двухслойные нано-структурированные металл-фуллереновые покрытия для многоострийных кремниевых структур, обеспечивающие повышение их проводимости и прочности, а также защиту структур от разрушающего действия ионной бомбардировки. Созданные и исследованные кремниевые многоострийные структуры с такими покрытиями представляют большой практический интерес, так как могут быть использованы в качестве стабильных источников полевой эмиссии в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме. Полученные данные о работе многоострийных структур с металл-фуллереновыми покрытиями представляют большой не только практический, но и научный интерес. Они позволяют лучше понять механизмы защиты острийных эмиттеров от воздействия ионной бомбардировки, а также влияние морфологии поверхности структур на закономерности их полевой эмиссии. Полученные данные о формировании с помощью электроэрозионной обработки многоострийных молибденовых структур и их функционировании с защитными фуллереновыми покрытиями представляют научный и практический интерес. Они свидетельствуют о возможности обеспечения большого усиления поля у поверхности таких структур и о перспективности их использования в высоковольтных электронных устройствах.

### **Объекты и методы исследования**

Объектами исследования были:

- Многоострийные полевые эмиттеры из кремния n- и p-типа с двухслойными металл

- фуллереновыми покрытиями, включающими слой молибдена толщиной 5 - 20 нм и нанесенный поверх него слой молекул фуллеренов  $C_{60}$  толщиной 2 - 10 монослоев. Исследованы образцы малой ( $\sim 0.03 - 0.2 \text{ мм}^2$ ) и большой ( $\sim 0.1 - 1 \text{ см}^2$ ) площади, отличающиеся радиусом  $R$  острий и их количеством  $N$  на поверхности, высотой  $h$  острий и расстоянием  $L$  между ними.

- Многоострийные полевые эмиттеры с площадью эмитирующей поверхности  $\sim 1 \text{ мм}^2$ , изготовленные с использованием электроэрозионной обработки молибденовых стержней, с защитным фуллереновым покрытием толщиной 2 монослоя.

Для получения информации о закономерностях функционирования полевых эмиттеров выполнены численные расчеты и эксперименты. В расчетах использовались физические пакеты COMSOL Multiphysics и SRIM, позволяющие получать информацию о распределении электрических полей в использованных анализирующих структурах и о потоках электронов и ионов, а также о механизме функционирования защитных покрытий. Экспериментальные исследования полевой эмиссии катодов выполнены в диодных и триодных анализирующих структурах. Для определения морфологии и состава поверхности исследуемых полевых эмиттеров использовались следующие экспериментальные методы:

- сканирующей электронной микроскопии (СЭМ);
- рентгеноспектрального микроанализа (РСМА);
- полевой эмиссионной микроскопии.

#### **На защиту выносятся следующие основные положения**

- 1) Нано-структурированные двухслойные металл-фуллереновые покрытия, включающие слой молибдена толщиной 5 - 20 нм и нанесенный поверх него слой молекул фуллерена  $C_{60}$  толщиной 2 - 10 монослоев, на поверхности многоострийных кремниевых катодов позволяют обеспечить стабильное функционирование катодов в высоковольтных электронных приборах при их эксплуатации в техническом вакууме ( $\sim 10^{-7}$  Торр) в условиях интенсивной ионной бомбардировки.
- 2) Стабильная работа кремниевых многоострийных катодов с двухслойными покрытиями из молибдена и молекул фуллерена в условиях интенсивной ионной бомбардировки может быть объяснена с учетом следующих обстоятельств:
  - Быстрые ионы, бомбардирующие острийный эмиттер, теряют в тонком фуллереновом покрытии (2 - 10 монослоев) лишь малую долю своей энергии (менее 1%), и основная доля их энергии выделяется в молибденовой подложке.
  - Фуллереновое покрытие препятствует уходу с катода атомов молибдена, выбитых быстрыми ионами из молибденовой подложки и уменьшает более, чем на порядок поток атомов молибдена, покидающих катод.
- 3) Активирование металл-фуллереновых покрытий на поверхности многоострийных кремниевых катодов потоком медленных (40 эВ) ионов калия позволяет существенно (на 15 - 20%) и долговременно уменьшить рабочие напряжения, необходимые для отбора фиксированного тока полевой эмиссии.
- 4) Многоострийные кремниевые структуры с оптимизированными двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями позволяют обеспечить токи эмиссии до 100 мА при плот-

ностях тока эмиссии до  $\sim 0.4 - 1.0 \text{ А/см}^2$ .

- 5) Изготовленные с использованием технологически простой электро-эрозионной обработки многоострийные молибденовые структуры с защитными покрытиями из молекул фуллерена  $C_{60}$  толщиной 2 монослоя, активированными потоком медленных (40 эВ) ионов калия, позволяют обеспечить стабильную работу высоковольтного электронного прибора в техническом вакууме ( $\sim 10^{-7}$  Торр) при отборе средних по поверхности плотностей тока полевой эмиссии до  $\sim 30 \text{ мА/см}^2$  и токах с одиночного острия до 1.5 мкА.

**Достоверность полученных результатов** определяется использованием современных экспериментальных методик и методов расчёта, воспроизводимостью результатов, согласием полученных результатов с существующими литературными данными в случаях, когда такое сопоставление возможно.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, в частности на: 10-ой (Санкт-Петербург, 2014) и 11-ой (Сеул, Южная Корея, 2016) международных конференциях «International Vacuum Electron - Sources Conference (IVESC)»; 38-ой (Майнц, Германия, 2013), 39-ой (Тусон, США, 2014), 41-ой (Копенгаген, Дания, 2016) международной конференции «International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz»; 14-ой международной конференции «International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition, BALD» (Санкт-Петербург, 2016); 4-ой международной конференции-школе «Advanced Carbon NanoStructures and Methods of Their Diagnostics» (Санкт-Петербург, 2015); 12-ой Международной конференции «Advanced Carbon NanoStructures» (Санкт-Петербург, 2015); 15-ой и 16-ой зимних школах-семинарах по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2012, 2015); научно-практической конференции с международным участием в рамках недели науки СПбПУ (Санкт-Петербург, 2015 г.); всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2014); 3-й всероссийской молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (Уфа, 2015).

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении работ по гранту РФФИ № 11-02-00425, гранту Правительства по договору №11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки Российской Федерации, гранту РНФ № 16-12-10010, по грантам правительства Санкт-Петербурга 2014 (№ 14502 от 05.12.2014) и 2016 (№ 15414 от 28.11.2016) года, а также по гранту УМНИК (№ 5205ГУ1/2014 от 17.02.2015).

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 22 работы, в том числе: 7 статей в журналах (6 из перечня ВАК и 5 из международных баз данных SCOPUS и Web of Science), 14 работ - тезисы докладов на конференциях, 1 патент на полезную модель.

### **Личный вклад автора**

Автор внес решающий вклад в разработку методики расчета и определение в численных расчетах влияния морфологии поверхности многоострийных структур на их эмиссионные характеристики, а также в расчете закономерностей взаимодействия бомбардирующих эмиттер ионов с его металл-фуллереновым покрытием, участвовал в разработке методов



экспериментального исследования и является основным исполнителем экспериментальных исследований, активно участвовал в обсуждении всех полученных результатов.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объём диссертации 137 страниц, включая 72 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 69 библиографических названий.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Соминскому Геннадию Гиршевичу, а также коллективу лаборатории сильноточной и СВЧ электроники, в особенности Тумаревой Татьяне Алексеевне за неоценимую помощь и поддержку в научной работе.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** к диссертационной работе сформулированы актуальность выбранной темы, поставлена цель диссертационной работы, оговорены задачи, решаемые в работе, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, описаны объекты исследований, приведены положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора, а также кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** приведен обзор научной литературы по теме диссертации. Основное внимание было уделено имеющимся данным о полевых эмиттерах, которые возможно использовать при создании некоторых типов миниатюрных высоковольтных электронных приборов, таких, например, как СВЧ усилители и генераторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также портативные источники рентгеновского излучения.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию методов экспериментальных исследований и аппаратуры, а также использованных в работе методов расчёта.

Для определения влияния морфологии поверхности многоострижных катодов на достижимые их эмиссионные характеристики и для выбора оптимальной морфологии были выполнены расчеты с использованием программы COMSOL. Решалась трехмерная задача, в которой задавалась форма острий (конические острия со скругленной вершиной и с характерным размером сечения основания 5 мкм), приближенно соответствующая форме острий, создаваемых с помощью используемой технологии изготовления кремниевых структур. Работа выхода острий  $e\phi$  в расчетах варьировалась от максимального значения 5.3 эВ, соответствующего работе выхода неактивированного слоя фуллеренов, до 4.0 эВ, которое могло быть получено в результате активирования. Были определены эмиссионные характеристики многоострижных катодов с площадью эмитирующей поверхности  $S = 0.2 \text{ см}^2$ , отличающихся работой выхода поверхности, высотой острий  $h$  и расстоянием  $L$  между ними, а также радиусом вершины  $R$ . В расчетах определялось распределение электрического поля у поверхности острия. Затем с использованием уравнения Фаулера-Нордгейма определялись распределение плотности тока с поверхности острия и полный ток с него. На основании полученных данных суммировались токи со всех острий и рассчитывались вольт-амперные характеристики катода. Расчет проводился до токов на коллектор, соответствовавших на одно острие току 10 мкА.

Для получения информации о механизме работы металл-фуллереновых покрытий и возможностей их использования для защиты катодов от разрушающего действия ионной бомбардировки были проведены расчеты с использованием программы SRIM. Определялись закономерности прохождения быстрых ионов азота (с энергиями от 1 до 15 кэВ) сквозь защитный фуллереновый слой толщиной 2 - 10 монослоёв, а также закономерности прохождения сквозь этот слой частиц подложки, десорбированных с нее прошедшими сквозь фуллереновое покрытие быстрыми ионами. В расчетах двухслойное фуллереновое покрытие заменялось слоем той же толщины (приблизительно 1.9 нм) однородно распределенных по объему атомов углерода с плотностью  $1.7 \text{ г/см}^3$ , соответствующей плотности атомов углерода в фуллерите. Такое приближение кажется приемлемым, так как взаимодействие ионов с фуллереновым покрытием определяется, видимо, в основном парными взаимодействиями ионов с атомами углерода в фуллереновых молекулах.

Кроме расчётов, проведены экспериментальные исследования. В качестве основы для создания полевых эмиттеров служили кремниевые многоострийные структуры, изготовленные Институтом кристаллографии РАН с использованием хорошо отработанной и достаточно простой технологии. Изучены многоострийные структуры с n- и p- типом проводимости. Структуры из кремния p-типа обладали малой проводимостью порядка  $\sim 0.1 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . Структуры же, изготовленные из сильно легированного кремния n-типа, хотя и имели гораздо более высокую проводимость  $\sim 10^3 - 10^4 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ , однако обладали большим количеством дефектов и были недостаточно прочны.

Для увеличения проводимости структур и их прочности, а также для их защиты от влияния ионной бомбардировки были разработаны и применены специальные двухслойные металл- фуллереновые покрытия. Для повышения проводимости и прочности кремниевых многоострийных структур на их поверхность напылялся слой молибдена толщиной 5 - 20 нм. Для защиты структур от разрушающего действия ионной бомбардировки поверх этой металлизации наносилось фуллереновое покрытие толщиной от 2 до 10 монослоев. Для уменьшения работы выхода поверхности эмиттера проводилось активирование металл-фуллеренового покрытия потоком медленных (40 эВ) ионов калия. Долговременное снижение работы выхода покрытий достигалось благодаря формированию в покрытии металло-фуллеренов типа эндо- ( $\text{K@C}_{60}$ ) и/или экзо-эдралов ( $\text{C}_{60}\text{@K}$ ). Была исследована также и работа эмиттеров с неактивированными фуллереновыми покрытиями.

Толщина нанесенных слоев молибдена контролировалась по изменению радиуса острия до напыления и после напыления слоя молибдена. Толщина фуллеренового покрытия контролировалась с использованием разработанной ранее методики [7] «кривых напыления». Поток ионов калия, используемый для активирования металл-фуллереновых покрытий, формировался с помощью специально изготовленной фокусирующей системы типа пушки Пирса. Опробованы в работе эмиттеры, активированные с использованием одно-, двух-, четырех- и пяти - стадийной обработки. В процессе двух-, четырех- и пяти - стадийной обработок на созданное перед этим покрытие снова наносилось 2 монослоя молекул фуллеренов  $\text{C}_{60}$  и созданное покрытие обрабатывалось потоком ионов калия.

Исследованы два типа кремниевых многоострийных катодов с металл-фуллереновыми

покрытиями: катоды малой площади  $\sim 0.03 - 0.2 \text{ мм}^2$  (КМП) и катоды большой площади  $\sim 0.1 - 1 \text{ см}^2$  (КБП). КМП создавались на торцевой поверхности кремниевых стержней длиной 15 мм и диаметром 1 мм. Использование такой системы с креплением обеспечивало дополнительное усиление поля у поверхности КМП. Количество острий  $N$  на вершине КМП варьировалось у разных образцов катодов в пределах от  $\sim 50$  до 300. КБП формировались на тонкой ( $\sim 300 \text{ мкм}$ ) кремниевой подложке. Количество острий  $N$  КБП варьировалось у разных образцов катодов в пределах от  $3 \cdot 10^3$  до  $10^6$ .

Наряду с исследованием кремниевых эмиттеров, была изучена также возможность создания и использования в качестве полевых эмиттеров многоострийных молибденовых структур (ММС). Многоострийные молибденовые структуры изготавливались в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) с помощью электроэрозионной обработки торцевой поверхности стержней квадратного сечения  $1 \times 1 \text{ мм}$  из молибдена. На этой площадке создавалось примерно 200 острий с характерным сечением у вершины  $\sim 3 - 5 \text{ мкм}$ . Для защиты от ионной бомбардировки молибденовых многоострийных структур на их поверхность с использованием той же методики, что использовалась при создании КМП и КБП, наносилось, а затем активировалось потоком ионов калия фуллереновое покрытие.

Характеристики поверхности многоострийных катодов контролировались до постановки в вакуумную камеру и после проведения экспериментов. Для контроля использовались современные методы исследований, включающие сканирующую электронную микроскопию (SUPRA 55VP-25-87) и рентгеновский микроанализ.

Экспериментальные исследования проводились в многофункциональном вакуумном приборе, оснащённом источниками напыления молибдена и фуллеренов, а также источником ионов калия, который использовался для активирования катодов. Нанесение покрытий и последующая их обработка проводилась в экспериментальном приборе без выноса на атмосферу. В вакуумной камере при непрерывной откачке с помощью криосорбционного и магнито-разрядного насосов обеспечивалось давление остаточного газа порядка  $10^{-10} - 10^{-9}$  Торр. Камера была оснащена системой напуска азота которая позволяла оперативно менять давление от указанного минимального до  $10^{-6}$  Торр и обратно. Проводимая перед началом измерений обработка катодов (их прогревы и нанесение на их поверхность покрытий) выполнялись при давлениях остаточного газа  $\sim 10^{-9} - 10^{-8}$  Торр. Основные измерения эмиссионных характеристик катодов выполнялись в техническом вакууме при повышенном давлении азота порядка  $10^{-7}$  Торр.

Измерения эмиссионных характеристик КМП, ММС и КБП проводились в одном и том же вакуумном приборе. В случае эмиттеров малого сечения благодаря дополнительному усилению поля можно было располагать коллектор на большом расстоянии от катода и тем не менее работать при умеренных напряжениях. В непрерывном режиме работа КМП и ММС испытывалась в диодной системе катод-коллектор (экран) полевого эмиссионного микроскопа-проектора с расстоянием между катодом и экраном  $1.2 - 1.5 \text{ см}$ . В импульсном режиме для экранировки коллектора от импульсных наводок со стороны катода использовалась расположенная вблизи экрана сетка. Площадь экрана, бомбардируемая электронами, существенно (примерно на 4 порядка) превышает площадь эмитирующей многоострийной

структуры КМП и ММС. Поэтому, плотность потока электронов на экран много меньше плотности тока эмиссии с поверхности катода. Невелика при этом и удельная мощность, выделяемая электронным потоком на экране. В результате при исследовании КМП и ММС было уменьшено влияние вторичных эффектов (например, нагрева экрана и газовой выделению с него) на работу эмиттера. Поэтому в непрерывном режиме можно было контролировать токи и временные изменения эмиссии катода при токах приблизительно до 300 мкА и при достаточно больших плотностях тока эмиссии катода вплоть примерно до  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>. При больших токах эмиссии измерения выполнялись в импульсном режиме.

В процессе исследования КМП и ММС, кроме того, регистрировалось увеличенное эмиссионное изображение, создаваемое потоком электронов с катода на экране. Изображение фиксировалось с помощью видеокамеры через специальное окно в вакуумной камере. Наблюдение за эмиссионными изображениями позволяло судить о поверхностной структуре эмиттера, а также о некоторых процессах, протекающих на его поверхности.

Для исследования КБП катоды малой площади удалялись из вакуумной камеры и на их месте в том же отсеке камеры располагались КБП. Измерения эмиссионных характеристик КБП выполнялись в диодной системе (рис. 1). Расстояние между катодом и коллекторной системой было равно 1.5 мм. Использование секционированного коллектора позволяло измерять токи эмиссии с разных участков катода.

В **третьей главе** приведены основные результаты исследований.

В численных расчетах были определены зависимости коэффициента усиления электрического поля  $\beta_{max}^c$  у вершины острий многоострийной структуры от их высоты  $h$  и радиуса  $R$  их вершины, а также от расстояния  $L$  между остриями. Исходные кремниевые острия, изготовленные по используемой технологии, имеют радиус от 5 до 15 нм. Для увеличения проводимости острий создавалось молибденовое покрытие толщиной не менее 5 нм. В случае необходимости толщина молибденового покрытия могла быть увеличена для повышения прочности острий. Однако увеличение толщины покрытия ограничено сверху необходимостью увеличения рабочих напряжений. Влияет на выбор рабочих напряжений не только соотношение между высотой и радиусом острий (их аспектное отношение), но также и взаимная экранировка острий. Взаимная экранировка мала при расстоянии между остриями  $L \geq 2h$ . При выполнении этого соотношения усиление поля близко по величине к значению  $\beta_{max}$ , характерному для уединенного острия. При  $L < 2h$  величина  $\beta_{max}^c/\beta_{max}$  падает с уменьшением отношения  $L/h$ . В связи с этим для получения фиксированного тока при

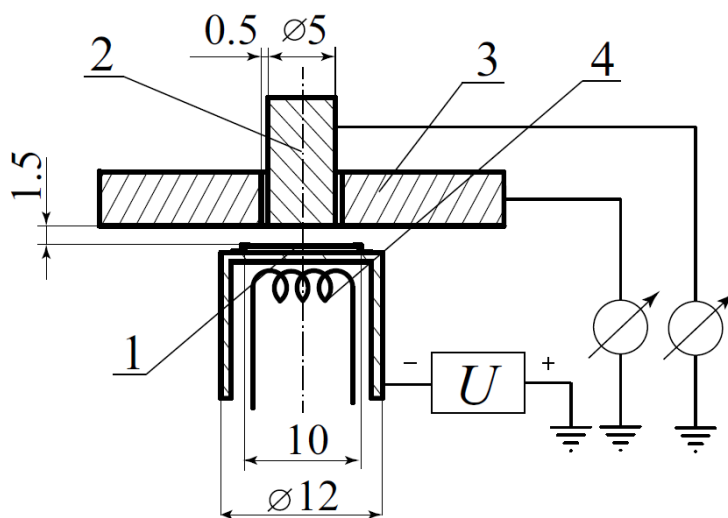


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной системы, использованной при исследовании КБП: 1 - многоострийный катод, 2 - коллектор, 3 - охранный электрод, 4 - подогреватель.

$L < 2h$  требуются большие напряжения. Однако, для получения токов эмиссии, достаточных для функционирования высоковольтных электронных приборов, допустима работа катода в условиях частичной экранировки. Учитывая тот факт, что острия существующих кремниевых катодов выдерживают отбор токов  $I$ , не превышающих некоторое предельное значение  $I_{extrem}$ , при выборе оптимальной морфологии поверхности многоострижных катодов для высоковольтных приборов приходится принимать компромиссное решение, при котором, с одной стороны, на поверхности катода должно быть создано достаточно большое количество острий  $N$ , удовлетворяющих соотношению  $N \geq I/I_{extrem}$ , а с другой, должна быть обеспечена работа электронного прибора при повышенном рабочем напряжении.

Из полученных данных следует, что в условиях когда практически отсутствует экранировка (при  $L = 2h = 60$  мкм), эмиттер площадью  $0.2 \text{ см}^2$  может обеспечить токи не более 50 мА. Большие токи могут быть получены с эмиттера той же площади, но с большим количеством острий на поверхности и при большем напряжении между катодом и анодом. Определяет выбор соотношения высоты острий и расстояния между ними, а также радиуса вершины острий допустимое значение напряжения  $U$  при эксплуатации катода. Проведенные расчеты свидетельствуют, что, например, при  $U = 17$  кВ многоострижная структура острий высотой 30 мкм с радиусом вершины  $R = 20$  нм при  $L/h = 0.5$  может обеспечить токи полевой эмиссии примерно до  $\sim 0.8$  А.

Уменьшить рабочие напряжения, необходимые для получения фиксированных значений токов можно, если использовать активированные металл-фуллереновые покрытия с работой выхода меньше величины 5.3 эВ, характерной для неактивированного фуллеренового покрытия. В расчетах не были учтены возможные ограничения тока эмиссии многоострижных катодов, обусловленные, например, конечной прочностью острий и тепловыми эффектами (конечной их теплопроводностью). Для таких сложных нано-структурированных систем, какими являются острия с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями, практически невозможно достаточно точно определить эти характеристики. В расчётах трудно также учесть тонкую структуру выступов на поверхности фуллеренового покрытия, формирование которых может заметно изменить усиление поля. Получить информацию о влиянии указанных факторов можно практически только в экспериментах.

Кроме описанных выше расчетов, нацеленных на определение связи эмиссионных характеристик катодов с морфологией их поверхности, были проведены расчеты, необходимые для определения закономерностей явлений, имеющих место при ионной бомбардировке металл-фуллереновых покрытий. Расчеты, выполненные с использованием программы SRIM, показали, что тонкослойное (2 монослоя) фуллереновое покрытие «прозрачно» для быстрых ионов азота. Быстрые ионы теряют менее 1 % своей энергии в покрытии, а основную долю энергии выделяют в подложке. С другой стороны, фуллереновое покрытие не позволяет уйти с катода большей части атомов молибдена, выбитых из подложки. В результате более, чем на полтора порядка уменьшается скорость распыления молибдена.

Экспериментальные исследования включали изучение работы КМП и КБП. Как показали проведенные измерения характеристик КМП, включающие примерно 50 острий, кремниевые структуры без покрытий разрушаются обычно уже при малых токах  $\sim 10 - 20$  мкА

и плотностях тока эмиссии со структуры ( $\sim 0.03 \text{ A/cm}^2$ ). Нанесение металл-фуллеренового покрытия позволяет увеличить проводимость и прочность структуры.

На начальном этапе работы КМП проводилась формовка катода, в процессе которой постепенно повышались токи эмиссии. В процессе формовки под действием пондеромоторных сил удалялись и/или перемещались слабо связанные с поверхностью частицы. Контроль автоэмиссионных изображений на разных этапах формовки свидетельствует, что распределение удаляемых и перемещаемых частиц, а также усиливающего поле нано-структур приблизительно однородно по поверхности катода и что эмиссионные неоднородности обусловлены, в основном, неоднородностями исходной многоострийной структуры.

КМП из кремния с проводимостью n-типа имели диаметр эмитирующей площадки  $\sim 0.2 \text{ мм}$ . На такой площади была создана структура, включающая приблизительно 50 острий. С такого катода, активированного по двухстадийной методике, в статическом режиме были получены токи эмиссии до 40 мкА, а с примерно такого же катода, но активированного по пятистадийной методике удалось, удавалось получать в статическом режиме ток примерно 300 мкА (рис. 2). При попытках отобрать токи большей величины, катоды разрушились. Наибольшая средняя по поверхности плотность тока эмиссии достигала значения  $1 \text{ A/cm}^2$ . Ток с единичного острия в таком режиме не превышал значений 5 – 6 мкА. Из полученных данных следует, что при работе с катодами n- типа проводимости следует использовать пятистадийную обработку фуллеренового покрытия.

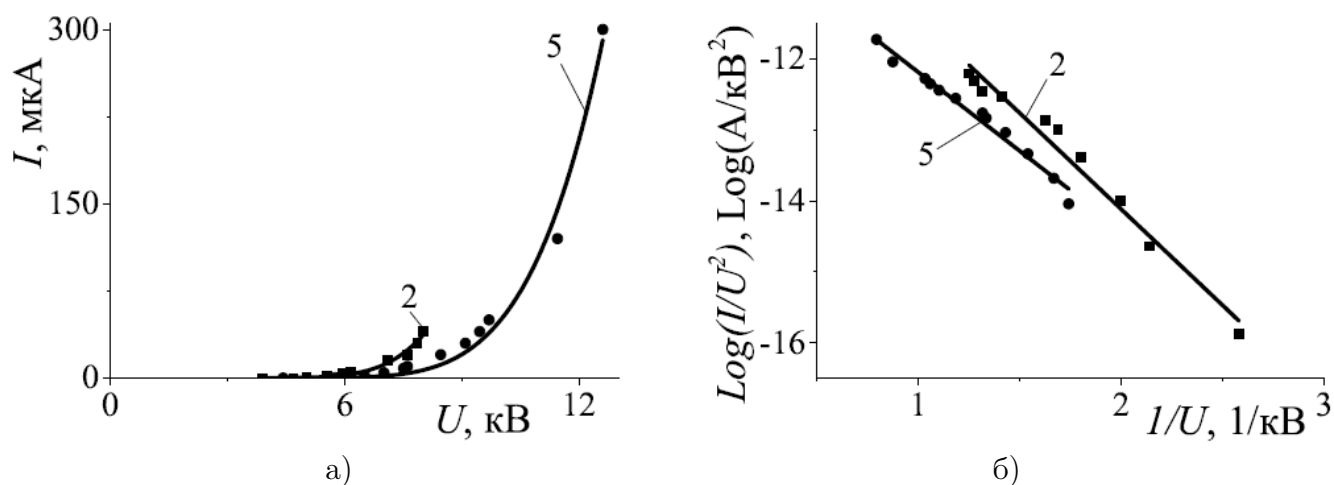


Рис. 2. Характеристики КМП n-типа с металл-фуллереновым покрытием, активированным по двухстадийной (2) и пятистадийной (5) методике, полученные в статическом режиме: а - вольтамперные характеристики; б - характеристики Фаулера-Нордгейма.

При исследовании катодов с p- типом проводимости, имевших существенно большую площадь эмитирующей поверхности и количество острий (площадка диаметром 0.5 мм, содержащая примерно  $\sim 300$  острий), исследования в статическом режиме проводились, как правило, при токах  $I \leq 300 \text{ мкА}$ . В случае КМП p- типа проводимости установлено, что количество стадий активирования слабо влияет на стабильность их работы, во всяком случае, при токах порядка 50 - 100 мкА. Однако при увеличении стадий активирования вырастали рабочие напряжения. Это можно связать с ростом количества молекул фуллерена  $\text{C}_{60}$ , оса-

ждаемых на острие при большом количестве стадий активирования, и с увеличением из-за этого радиуса вершины острий. Учитывая сказанное, основные измерения с катодами р-типа проведены с покрытиями, активированными по одностадийной методике.

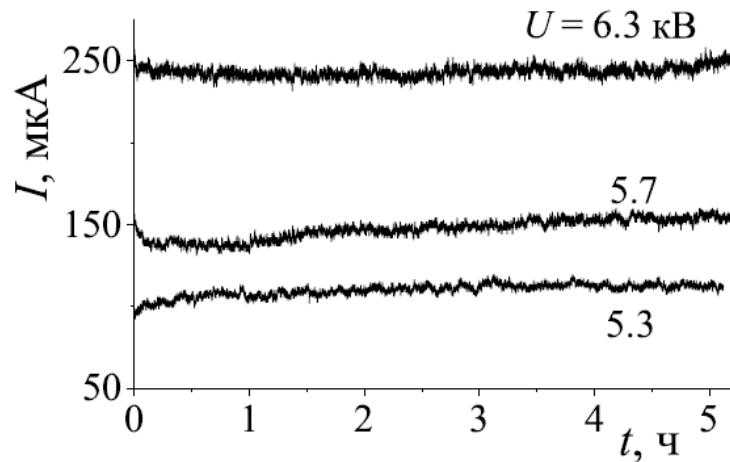


Рис. 3. Зависимости тока эмиссии от времени работы  $I(t)$  КМП из кремния р-типа с металл-фуллереновым покрытием, измеренные при разных начальных токах и напряжениях.

Полученные данные дают основание предположить, что фуллереновые структуры в составе металл-фуллеренового покрытия самовоспроизводятся в присутствии ионной бомбардировки по механизму, подобному описанному авторами [5] для одноострийных вольфрамовых эмиттеров с фуллереновым покрытием.

При работе КМП р-типа проводимости наибольшие токи эмиссии получены в импульсном режиме. Предельные токи эмиссии, при превышении которых происходило разрушение катода, достигали значений  $\sim 1.8-2.0$  мА. Даже при токах, близких к предельному, наблюдалась стабильная работа эмиттера (ток практически не менялся в течение часа). Средняя по поверхности катода плотность тока эмиссии при токе, близком к предельному, была порядка  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>, т.е. близка к предельной плотности тока, полученной в статическом режиме с катода из кремния п-типа, активированного с использованием пяти-стадийной методики.

Кроме изучения работы КМП из кремния была исследована работа эмиттеров из молибдена (ММС). Наблюдение структуры ММС в растровом электронном микроскопе показало, что при электроэрозионной обработке на поверхности катода формируется неупорядоченная структура выступов, характерный размер которых существенно меньше сечения вершины острий. Найденный из наклона характеристики Фаулера–Нордгейма фактор усиления поля для исследованной многоострийной структуры имел величину порядка  $10^4$ . Столь большое значение этого коэффициента, обусловленное усилением поля на выступах структуры, полученной в результате электроэрозионной обработки, позволяет получать ток около 300 мкА с исследованных катодов при умеренных напряжениях  $\sim 16$  кВ.

Были определены изменения во времени токов эмиттера без защитного покрытия и с

Изменения тока эмиссии во времени для типичного КМП, активированного по одностадийной методике иллюстрирует рис. 3. В условиях технического вакуума ток эмиссии слабо менялся в течение 5 часов. Флюктуации тока не превышали приблизительно  $\pm 2-3\%$ . При измерении характеристик  $I(t)$  наибольший интервал времени работы эмиттеров в течение одного дня не превышал 5 - 7 часов. Однако высокую стабильность созданных острийных полевых эмиттеров при эксплуатации в техническом вакууме подтверждают многократные длительные измерения характеристик  $I(t)$  данного катода, выполненные в разные дни.

защитным активированным фуллереновым покрытием. Для эмиттеров без покрытия характерно падение тока примерно на 10% в час. Нанесение защитного фуллеренового покрытия позволило свести влияние ионной бомбардировки к минимуму.

Были изучены КБП с активированным и неактивированным покрытием, содержавшие существенно большее, чем у КМП, количество острий. В таблице 1 указаны данные ряда исследованных катодов. Проведенные оценки свидетельствуют, что для исследованных КБП при их активировании работа выхода покрытия уменьшается до 15 – 20%.

Согласно полученным данным, катоды с активированным металл-фуллереновым покрытием позволяют получать токи эмиссии ориентировочно до 30 - 45 мА при средней по поверхности плотности тока  $\sim 100 - 150$  мА/см<sup>2</sup>. Таким образом, плотности тока эмиссии КБП с активированным покрытием существенно меньше предельно достижимых плотностей тока катодов малой площади с активированным покрытием ( $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>). Малы для таких катодов и предельно достижимые токи с одиночного острия ( $\sim 1 - 4$  мкА). Одна из причин такого различия указанных характеристик катодов малой и большой площади связана с худшей однородностью структуры острий катодов большей площади. Но это не единственная причина. Другая причина связана, видимо, с особенностями измерительной системы, использованной при исследовании КБП. Измерение характеристик КБП проводилось в диоде с зазором коллектор - катод 1.5 мм. Использование такого малого зазора позволяет обеспечить необходимые для полевой эмиссии поля у катода при умеренных напряжениях между катодом и коллектором, но в такой системе плотность тока электронов, бомбардирующих коллектор, много больше по величине, чем в системе, использованной при исследовании КМП. Поэтому при исследовании катодов большой площади может быть велико влияние вторичных эффектов у коллектора, связанных с его разогревом.

Катод	$R$ , нм	$h$ , мкм	$L$ , мкм	$S$ , см <sup>2</sup>	$N$	$j_{max}$ , мА/см <sup>2</sup>	$I_{max}$ , мА
Катоды с активированным покрытием							
К1	10	60	60	0.2	6000	30	6
К2	20	30	60	0.1	3000	130	13
К3	25	30	30	0.2	22000	105	21
К4	20	15-20	15-20	0.3	95000	150	45
Катоды с неактивированным покрытием							
К5	32	30	30	1	$10^5$	127	127
К6	37	30	30	0.25	28000	400	100

Таблица 1. Основные характеристики типичных из исследованных катодов.

Измерения зависимостей тока эмиссии от времени показали, что стабильность работы КБП с активированным покрытием зависит от величины начального тока эмиссии. Например, для катода К4 при начальном токе 30 мА наблюдалось падение тока во времени, относительное изменение которого за три часа достигало приблизительно 5%. Однако при меньшем начальном токе 11 мА изменения эмиссии за тот же интервал времени не превышало  $\sim 0.2\%$ . Такое непропорциональное уменьшение скорости дезактивировки свидетельствует, видимо, о том, что падение эмиссии связано не с ионной бомбардировкой. Объяснить отмеченное непропорциональное изменению тока уменьшение скорости падения эмиссии можно, если учесть



влияние на работу катода разогрева коллектора под действием электронной бомбардировки, приводящего к десорбции частиц с его поверхности и к их оседанию на катод. Оседание на катод десорбированных с коллектора частиц может привести к увеличению работы выхода катода и к падению вследствие этого тока эмиссии. Кажется очевидным, что заметный разогрев коллектора и связанная с этим десорбция частиц с его поверхности возможны только при достаточно больших токах электронов, бомбардирующих его поверхность.

Исследованные КБП с неактивированным покрытием позволяли получать большие токи эмиссии, чем катоды с активированным покрытием (ориентировочно до 100 мА) и большие плотности тока эмиссии ( $\sim 0.4 \text{ A/cm}^2$ ). Пониженные по сравнению с неактивированными предельные токи и плотности тока с активированных катодов можно объяснить, если учесть ослабление связи фуллеренового покрытия с молибденовой подложкой из-за проникновения в процессе активирования покрытия части атомов калия (интеркалирования) в область между фуллереновым покрытием и подложкой. Слой атомов калия в этой области ослабляет, видимо, связь фуллеренового покрытия с подложкой. Влияние десорбированных с коллектора частиц на функционирование неактивированных катодов проявлялось при больших токах (см. рис. 4 - б), чем в случае активированных КБП, что представляется естественным, если учесть исходно большую работу выхода неактивированных катодов.

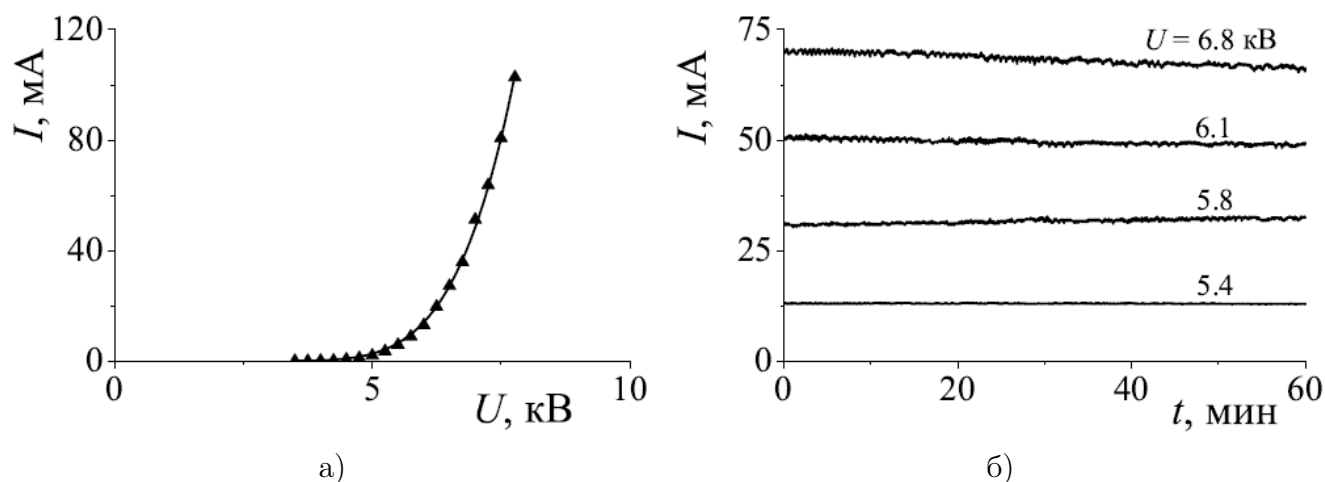


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика (а) и зависимости тока эмиссии от времени (б) КБ с неактивированным металл-фуллереновым покрытием. Импульсный режим (1 мкс, 50 Гц).

В **заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертации:

Разработаны металл-фуллереновые покрытия для МКС, обеспечивающие повышение их проводимости и прочности и защищающие катоды этого типа от разрушающего действия ионной бомбардировки. Разработаны методы активирования металл - фуллеренового покрытия на поверхности МКС потоком медленных (40 эВ) ионов калия, позволяющие снизить до 15-20% рабочие напряжения, необходимые для получения фиксированных токов эмиссии. Определено влияние морфологии поверхности МКС с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями на достижимые эмиссионные характеристики и выработаны методы оптимизации морфологии покрытий. Определены основные закономерности работы МКС с оптимизированными металл-фуллереновыми покрытиями при отборе больших токов в условиях

технического вакуума. Продемонстрирована возможность стабильной работы МКС с оптимизированными металл-фуллереновыми покрытиями при токах полевой эмиссии до 100 мА и плотностях тока эмиссии до  $0.4 - 1.0 \text{ А/см}^2$ . Разработана упрощенная методика создания многоострийных структур с помощью электроэрозионной обработки молибдена. Исследована работа ММС с активированным фуллереновым покрытием в условиях технического вакуума и продемонстрирована перспективность их использования в миниатюрных высоковольтных электронных приборах.

### Список публикаций по теме диссертации

1. Соминский, Г.Г. Разработка в СПбГПУ полевых эмиттеров для электронных устройств, работающих в техническом вакууме. / Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев // Изв. Вузов, Прикладная нелинейная динамика. — 2012. — Т. 20, № 3. — С. 94–107.
2. Sominski, G.G. Cold field emitters for electron devices operating in technical vacuum / G.G. Sominski, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev et al. // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. — 2013. — Vol. 2, no. 182. — Pp. 136–141.
3. Соминский, Г.Г. Многоострийные полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа / Г.Г. Соминский, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев и др. // Журнал технической физики. — 2015. — Т. 85, № 1. — С. 138–142.
4. Соминский, Г.Г. Простой в изготовлении многоострийный полевой эмиттер / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева и др. // Журнал технической физики. — 2015. — Т. 85, № 7. — С. 135–137.
5. Соминский, Г.Г. Полевые эмиттеры нового типа для высоковольтных электронных устройств / Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев и др. // Известия вузов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 7. — С. 568–576.
6. Glyavin, M.Y. The concept of an electron-optical system with field emitter for a spectroscopic gyrotron / M.Y. Glyavin, V.N. Manuilov, G.G. Sominskii et al. // Infrared Physics and Technology. — 2016. — Vol. 78. — Pp. 185–189.
7. Соминский, Г.Г. Полевая эмиссия многоострийных кремниевых структур с защитными покрытиями / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева и др. // Журнал технической физики. — 2016. — Т. 86, № 11. — С. 108–111.
8. Соминский, Г.Г. Разработка в СПбГПУ полевых эмиттеров для электронных устройств, работающих в техническом вакууме / Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Светлов И.А. и др. // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. — Саратов: 2012. — февраль. — С. 13–14.
9. Соминский, Г.Г. Перспективные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств / Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев и др. // Материалы 16-й международной зимней школы по СВЧ электронике и радиофизике. — Саратов: 2015. — февраль. — С. 65.
10. Соминский, Г.Г. Разработка полевого эмиссионного источника для диагностического гиротрона субмиллиметрового диапазона длин волн / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев,

- Т.А. Тумарева // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт Физики, Нанотехнологий и Телекоммуникаций / Под ред. В.Э. Гасумянца, Д.Д. Карова; СПбПУ Петра Великого. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та., 2015. — 29 ноября-5 декабря. — С. 137–139.
11. Соминский, Г.Г. Многоострый полевой эмиттер большой площади. / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева // Тезисы докладов III Всероссийской молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» / Под ред. Р.З. Бахтизина; Башкирский государственный университет. — Уфа: Изд.РицБашГУ, 2015. — 1-4 декабря. — С. 128.
  12. Sominski, G.G. Cold field emitters for electron devices operating in technical vacuum / G.G. Sominski, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev et al. // Proc. of 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). — Mainz on the Rhine, Germany: 2013. — 1-6 September. — Pp. 1–2.
  13. Sominski, G.G. Multitip field emitters for electron devices operating in technical vacuum / G.G. Sominski, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva et al. // Proc. of Vacuum Electron Sources Conference (IVESC), 2014 Tenth International. — Saint-Petersburg: 2014. — June. — Pp. 242–243.
  14. Соминский, Г.Г. Многоострые полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева // Материалы Восьмого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. Наука и инновации в технических университетах. — Россия, Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та., 2014. — 27-29 октября. — С. 135–137.
  15. Sominski, G.G. Multitip field emitters with fullerene protecting coatings / G.G. Sominski, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva, M.V. Mishin // Proc. of Advanced Carbon Nanostructures 2015 / Ioffe Institute. — Saint-Petersburg, Russia: Ed. Ioffe Institute RAS, 2015. — June 29 – July 3. — P. 89.
  16. Sominski, G.G. Optimization of multitip field emitters with fullerene protecting coatings / G.G. Sominski, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva // Proc. of The Fourth Conference-school for young scientists Advanced Carbon Nanostructures And Methods of Their Diagnostic / Ioffe Institute. — Saint-Petersburg, Russia: Ed. Ioffe Institute RAS, 2015. — 1 jule. — P. 40.
  17. Соминский, Г.Г. Выбор оптимальной морфологии многоострых полевых эмиттеров из кремния / Г.Г. Соминский, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева // Сборник тезисов докладов IV Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» / Под ред. Р.З. Бахтизина; Башкирский государственный университет. — Уфа: Изд.РицБашГУ, 2016. — 29 ноября-02 декабря. — С. 108.
  18. Sominski, G.G. Silicon field emitters with two-layer metal-fullerene coatings for diagnostic gyrotrons / G.G. Sominski, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva // Proc. of 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). — Copenhagen, Denmark: 2016. — Sept. — Pp. 1–2.
  19. Sominski, G.G. Multi-tip field emitters for electron devices operating in technical vacuum / G.G. Sominski, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva et al. // Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). — Tucson, USA: 2014. — September. — Pp. 1–2.

20. Sominski, G.G. Protective coatings for tip field emitters operating at high voltages / G.G. Sominski, T.A. Tumareva, E.P. Taradaev // Proc.of 14th Baltic Conf. on Atomic Layer. — Russia, St.-Peterburg: 2016. — 2-4 october. — P. 62.
21. Taradaev, E.P. Influence of surface morphology on the characteristics of multi-tip field emitters with two-layer metal – fullerene coatings / E.P. Taradaev, G.G. Sominski, T.A. Tumareva // Proc. Of 11th Int. Vacuum Electron Sources Conference. — Korea, Seoul: 2016. — 18-20 october. — Pp. 67–68.
22. Острийный полевой эмиттер: п. м. 151235 Российская Федерация : МПК h 01 j 1/30 / Г.Г. Соминский, Т. А. Тумарева, Е. П. Тарадаев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»). — по 2014117341 /07; заяв. 29.04.2014; опубл. 27.03.2015, Бюл. по 9. — 2015.

### Список цитируемой литературы

- [1] Whaley, D. R. 100 W Operation of a Cold Cathode TWT / D. R. Whaley, R. Duggal, C. M. Armstrong et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2009. — May. — Vol. 56, no. 5. — Pp. 896–905.
- [2] Соминский, Г.Г. Перспективные полевые эмиттеры из углеродных нанотрубок, графена и полупроводников: Последние разработки / Г.Г. Соминский, Т.А. Тумарева // Известия высших учебных заведений. — 2015. — Т. 23, № 2. — С. 74–93.
- [3] Шешин, Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов / Е.П. Шешин. — Изд-во МФТИ М., 2001. — С. 13–20, 102–167.
- [4] Абаньшин, Н.П. Планарная наноструктура с полевой эмиссией пленки алмазоподобного углерода для построения низковольтного катода с развитой поверхностью / Н.П. Абаньшин, Ю.А. Аветисян, Г.Г. Акчурин и др. // Письма в ЖТФ. — 2016. — Т. 42, № 10. — С. 25–31.
- [5] Тумарева, Т.А. Работа полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме / Т.А. Тумарева, Г.Г. Соминский // Журнал технической физики. — 2013. — Т. 83, № 7. — С. 121–124.
- [6] Гиваргизов, Е.И. Скорость роста нитевидных кристаллов по механизму пар–жидкость–кристалл и роль поверхностной энергии / Е.И. Гиваргизов, А.А. Чернов // Кристаллография. — 1973. — Т. 18, № 1. — С. 147–153.
- [7] Тумарева, Т.А. Острийные полевые эмиттеры с фуллереновым покрытием / Т.А. Тумарева, Г.Г. Соминский, А.А. Ефремов, А.С. Поляков // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, № 2. — С. 105–110.