



Сторублев Антон Вячеславович

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СВЧ И
СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2022

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель:

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов, профессор кафедры физики твердого тела.

Официальные оппоненты:

Архипов Александр Викторович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор высшей инженерно – физической школы, г. Санкт – Петербург.

Тимошенко Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор по кафедре микроэлектроники, директор института нано- и микросистемной техники, национальный исследовательский университет – МИЭТ, г. Москва, г. Зеленоград.

Ведущая организация:

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

Защита диссертации состоится «02 декабря» 2022 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 10 корпус СГУ, аудитория 511.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-storableva-antona>

Автореферат разослан « » октября 2022 года

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.392.01

Сысоев Илья Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена развитием адаптивных возможностей общества, направленных на создание и непрерывное совершенствование систем спутниковой связи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия и проч., которые основываются на трех главных составляющих используемой электронной компонентной базы: увеличении частотного диапазона и выходной мощности, снижении времени готовности. Приборы СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и большой мощности имеют широкое применение, как в наземных, так и в воздушно-космических радиотехнических устройствах. Все более высокие требования по надежности и долговечности предъявляются, в частности, к элементной базе радиоаппаратуры для систем навигации и космической связи. Для них требуется постоянное совершенствование эксплуатационных характеристик.

Основная проблема при создании мощных источников когерентного субтерагерцового излучения заключается в необходимости получения источников электронов со сверхвысокими плотностями тока, что в немалой степени, кроме увеличения мощности, обусловлено уменьшением размеров приборов. Перспективным направлением их разработки является применение полевых катодов. Их достоинства и преимущества перед термоэмиссионными и другими видами источников электронов хорошо известны. Однако, несмотря на значительные усилия ученых многих стран мира и достижения в технологии полупроводниковой микроэлектроники, до сих пор не удалось достичь существенного прогресса в создании приборов с автоэмиссионными катодами (АЭК). Разработка и реализация новых подходов, обеспечивающих получение сильноточной полевой эмиссии электронов в благоприятных (неразрушающих) для твердых тел условиях эксплуатации является актуальной проблемой, как в фундаментальном, так и в прикладном плане.

Перспективным материалов для создания сильноточных АЭК являются наноуглеродные пленочные структуры [1,2]. В работе [3] с использованием неравновесной микроволновой плазмы паров этанола низкого давления определены области режимов для получения нанокompозитных алмазографитовых пленочных покрытий, содержащих наноалмазную и графитовую фазы в различных объемных соотношениях. Показано, что при их использовании могут быть снижены пороги активации полевой эмиссии и увеличены плотности автоэмиссионных токов в импульсе микросекундной длительности свыше 100 A/cm^2 .

Несмотря на полученные сверхвысокие плотности автоэмиссионных токов, которые более, чем на порядок превышают лучшие мировые достижения в области вакуумно-плазменной электроники, остается много вопросов, которые требуют своего исследования для того, чтобы уверенно рекомендовать полевые источники электронов на основе композитных алмазграфитовых пленочных структур для создания и модернизации мощных устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов. Среди них вопросы критичности параметров полевых источников электронов к изменениям температурно-вакуумных и экстремально сильных электрополевых условий эксплуатации, воспроизводимость, долговечность и управляемость эмиссионных характеристик, изучение фундаментальных электрофизических факторов, определяющих/влияющих на эти характеристики катодов и др.

В настоящее время в СВЧ устройствах с низковольтным управлением для формирования электронного пучка используют катодно-сеточные узлы (КСУ), которые включают в себя металлопористый катод (МПК) с порами, заполненными примесными добавками, которые уменьшают температурный коэффициент работы выхода электронов, и, управляющей интенсивностью электронного потока, сетки. В процессе эксплуатации мощных ЭВП с температурой нагрева МПК до 1200 °С увеличивается эмиссия вторичных электронов из-за термического напыления на сетку активных примесей МПК. Это искажает рабочие характеристики устройств, приводит к деградации КСУ и радиотехнической системы в целом. В связи с этим разработка низкоэмиссионных покрытий для мощных СВЧ устройств на основе МПК продолжает оставаться в центре внимания их разработчиков [4].

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии производства и характеристик источников электронов и катодно сеточных узлов устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности.

Для достижения цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработать технологические методики создания сильноточных полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям, включая получение автоэмиссионных ВАХ с заданными крутизной, критичностью к изменению управляющих напряжений, порогами начала полевой эмиссии и максимальными автоэмиссионными токами.

2. Исследовать фундаментальные факторы, ограничивающие максимальную плотность тока, стабильность и долговечность полевых источников электронов на основе композитных алмазграфитовых пленочных структур.

3. Изучить долговременную воспроизводимость эмиссионных характеристик сильноточных полевых источников электронов на основе композитных углеродных пленочных покрытий с плотностью автоэмиссионного тока не менее 100 A/cm^2 в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации.

4. Разработать технологию получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий с повышенной работой выхода вторичных электронов и низкой скоростью термического осаждения на них активных примесных добавок металлопористых термокатодов катодно-сеточных узлов мощных устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов.

Методы исследований.

Для получения пленочных алмазографитовых композитов с различными электрофизическими свойствами использовалась вакуумная установка с безмасляной системой откачки и высокоионизованной низкотемпературной плазмой микроволнового газового разряда с электронно-циклотронным резонансом на частоте 2,45 ГГц. Исследования структурно-фазового состава, морфологии, других электрофизических свойств композитных структур осуществлялись с использованием методов атомно-силовой и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света (КРС), др. методов. Определение элементного состава поверхностей автоэмиссионных структур проведено с использованием автоэмиссионного сканирующего микроскоп MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Исследования автоэмиссионных характеристик проводились в сильных постоянных и импульсных электрических полях микросекундной длительности в условиях высокого вакуума (10^{-6} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Обработка результатов исследований и расчеты при построении теоретических моделей проводились с использованием программного обеспечения используемой приборной базы и статистических методов на ЭВМ.

Научная новизна работы:

1. Установлены фундаментальные факторы и процессы, ограничивающие максимальную плотность тока, стабильность и долговечность полевых источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур.
2. Впервые определены технологические возможности создания сильноточных полевых источников электронов на основе алмазографитовых пленочных структур, удовлетворяющих различным схмотехническим

требованиям, включая получение ВАХ с различными крутизной, порогами начала эмиссии и максимальными полевыми токами.

3. Показано, что АЭЖ на основе низкоомных алмазграфитовых структур, по сравнению с высокоомными, имеют высокую крутизну ВАХ, более низкий порог напряженности поля начала автоэмиссии, а максимальный автоэмиссионный ток достигается при меньшей напряженности электрического поля. Диапазон рабочих напряжений, обеспечивающий одинаковый максимальный автоэмиссионный ток, у высокоомных источников электронов в разы больше, чем у низкоомных. Предложена теоретическая интерпретация механизмов, обеспечивающих получение заданных экспериментальных результатов.

4. Установлено влияние плазменного фторирования углеродных покрытий на эмиссионную способность управляющих сеток ЭВП, а также скорость формирования на них новой фазы из термически распыленных активных примесей МПК. Показано, что дипольная поляризация углеродных покрытий, осажденных на управляющие сетки мощных СВЧ устройств, увеличивает работу выхода электронов и уменьшает более, чем на порядок, их эмиссионные токи, позволяет в разы увеличить их долговечность.

Практическая значимость работы заключается в разработке новых научно-технических решений, улучшающих эмиссионные и эксплуатационные характеристики мощных устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов:

1. Технологические методики создания сильноточных полевых источников электронов на основе алмазграфитовых пленочных структур, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям.

2. Установлено, что при долговременной эксплуатации ЭВП СВЧ в нестационарных температурно-вакуумных условиях преимуществом МПК является высокая восстановительная способность эмиссии после повторной откачки прибора до исходного рабочего давления. Достоинством сильноточных алмазграфитовых АЭЖ является устойчивость эмиссионных характеристик в более широком интервале изменений рабочего давления. Это улучшает эксплуатационные характеристики СВЧ устройств в отсутствие встроенных средств откачки.

3. Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик сильноточных алмазграфитовых АЭЖ в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации с 8 циклами изменения вакуума в диапазоне от $9 \cdot 10^{-6}$ Па до 0,1 Па и аварийным отключением нестабилизированного питающего напряжения суммарной длительностью свыше 13,5 часов показали, что полевой ток изменялся в пределах от 6 до

8·мА, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора $1,3 \cdot 10^3$ А/см².

4. Предложен способ восстановления эмиссионной способности алмазграфитовых АЭК при долговременной эксплуатации со сверхвысокими плотностями токов путём обратного осаждения углеродной фазы, распылённой с АЭК на анод и другие близлежащие электроды.

5. Разработана технологическая методика получения углеродного антиэмиссионного сеточного покрытия КСУ устройств СВЧ, обеспечивающая увеличение работы выхода электронов и уменьшение вероятности прилипания на сетки термически испаренных атомов активных примесей МПК. При этом замедляются изменения термо- и вторичной электронной эмиссия в КСУ, увеличивается КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных СВЧ устройств. Разработана методика измерения электронной термоэмиссии управляющей сетки КСУ МПК мощных СВЧ устройств.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В экстремальных режимах эксплуатации сильноточных АЭК на основе низкоомных алмазграфитовых пленочных структур причиной нестабильности эмиссии и разрушения является возникновение на катоде условий для протекания скользящего поверхностного электрического разряда. Для высокоомных алмазграфитовых структур основным характером разрушения АЭК является эрозия катодного покрытия, которая обусловлена эмиссией электронов с возникновением факелов катодной плазмы и распылением материала автокатада.

2. Долговременная эксплуатация сильноточных АЭК на основе алмазграфитовых пленочных структур в нестационарных температурно-вакуумных условиях, включая экстремальные режимы полевой эмиссии с образованием светящихся катодных факелов и распылением материала автокатада при плотности эмиссионного тока более 1000 А/см², не нарушает полевой механизм эмиссии электронов. Термоэмиссионная составляющая тока, несмотря на интенсивное джоулево тепловыделение и катодное свечение, не вносит значимого вклада в ВАХ АЭК.

3. Изменение состава атмосферы остаточной среды мощных СВЧ устройств на основе алмазграфитовых АЭК приводит к изменению характеристик автоэмиссионных ВАХ, но не изменяет туннельный механизм эмиссии электронов. Эксплуатация алмазграфитовых АЭК в остаточной среде с повышенным парциальным давлением азота увеличивает пороги начала полевой эмиссии и ухудшает крутизну ВАХ. При восстановлении эмиссионной способности алмазграфитовых АЭК после долговременной

эксплуатации со сверхвысокими плотностями токов путём обратного осаждения углеродной фазы, распылённой с АЭК на анод и другие близлежащие электроды, пороги начала полевой эмиссии уменьшаются, а крутизна ВАХ, напротив, увеличивается.

4. Дипольная поляризация с использованием микроволнового плазмохимического фторирования углеродных покрытий, осажденных на управляющие сетки мощных СВЧ устройств, снижает скорость формирования на них фазы термически распыленных активных примесей МПК, увеличивает работу выхода электронов и при одинаковой длительности ускоренных испытаний с ЭВП СВЧ на основе МПК без углеродного покрытия на управляющей сетке уменьшает более, чем на порядок, вторичные эмиссионные токи, позволяет в разы увеличить долговечность.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: X Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2021 г. (г. Санкт-Петербург), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2019 г. (г. Санкт-Петербург), VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2018 г. (г. Санкт-Петербург), IV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2015 г. (г. Санкт-Петербург), VIII Всероссийской школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2021 г. (г. Саратов), VII Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2020 (г. Саратов), XV Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» 2020 (г. Саратов), IX научной конференции молодых ученых Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science 2019 (г. Саратов).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении грантов РФФИ № 19-38-90216 и РФФИ № 16-19-10033, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров кафедры физики твердого тела СГУ им. Н.Г. Чернышевского.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК, 4 работы, включенные в базы

SCOPUS или Web of Science, 7 работ в прочих изданиях, входящих в РИНЦ, получено 2 патента на изобретения РФ.

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в разработке и реализации технологии создания полевых эмиттеров, разработке экспериментальных макетов для изучения свойств катодов. Автор являлся организатором и соисполнителем их изготовления, являлся разработчиком и создателем установок для проведения экспериментов при исследовании АЭ. Автор совместно с руководителем разрабатывал методики проведения экспериментов, был основным исполнителем всех экспериментальных исследований. Автор совместно с руководителем подготавливал научный материал для представления общественности, принимал участие в очных мероприятиях с докладами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов работы, списка цитированной литературы. Материалы диссертации изложены на 114 страницах, содержат 42 рисунка, 3 таблицы и список цитированной литературы из 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и основные задачи работы, приведены научная новизна полученных результатов, их практическая ценность, апробация и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный обзор существующих принципов построения активных элементов интегральных микросхем для обработки радиоимпульсной информации, приведены преимущества микроэлектронных устройств, в которых для передачи импульсной информации вместо твердого тела используется вакуум. Рассмотрены методы получения углеродных материалов для высокоэmissiveнных пленочных покрытий полевых источников электронов, их достоинства и недостатки. Приведен анализ методов повышения долговечности существующих СВЧ устройств на основе металлопористых термокатодов, виды антиэmissiveнных пленочных покрытий управляющих сеток. На основании анализа литературных данных обосновываются цель и основные задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена разработке технологии получения и исследованию автоэmissiveнных характеристик источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур. Установлены закономерности взаимосвязей максимальных автоэmissiveнных токов со скоростью их увеличения, а также интервалами допустимых изменений

рабочих напряженностей в зависимости от поверхностной электропроводности алмазографитовых структур. Рассмотрены механизмы взаимосвязи максимальных плотностей полевых токов и крутизны ВАХ. Результаты интерпретированы особенностями влияния параметров импульсного воздействия сильных электрических полей на механизмы рассеяния и концентрацию дрейфующих в твердом теле электронов.

Получение пленочных алмазографитовых композитов с различными электрофизическими свойствами проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2,45 ГГц по методике, изложенной в [5]. Получены композиционные покрытия, представляющие собой графитовую матрицу с включениями алмазоподобных нанокристаллитов с размерами от 5-10 до 100 нм и поверхностной плотностью до 10^8 см⁻² (рис. 1). Рентгеноструктурные исследования показали присутствие в пленках включений мелкокристаллической фазы графита (002), алмазоподобной фазы кубической ориентации (111) и гексагональных решеток трех различных структурных модификаций (лонсдейлит, C(20H) и др.). Результаты рентгеноструктурного анализа подтверждены данными КРС (рис.2.). Для структур, полученных при давлениях паров этанола 0,05-0,07 Па (кривая 1), характерным является ярко выраженный двухпиковый спектр: сильной линии в области 1330 см⁻¹, которая свидетельствует о присутствии алмазной фазы, и второго пика в области 1580 см⁻¹, который указывает на присутствие графита, как кристаллического, так и аморфизованного. Появление в спектре КРС размытого сигнала в районе частоты 1150 см⁻¹ характерно для поликристаллических алмазных пленок (кривая 2). В графитовых пленках (кривая 3) доминирующим является сигнал в области 1580 см⁻¹. Присутствующий в спектре меньший по величине сигнал в области 1330 см⁻¹, свидетельствует о том, что материал содержит небольшое количество алмазной фазы, появление которой обусловлено кинетическими факторами.

Исследования автоэмиссионных характеристик алмазографитовых АЭЖ в зависимости от поверхностных сопротивлений пленочных структур показали, что с увеличением последних пороги начала эмиссии монотонно увеличиваются (рис.3). Так как для всех структур токи эмиссии при пороговых напряжениях составляли одинаковую величину (5 мкА), можно заключить, что зависимость между ними хорошо описывается законом Ома. Максимальные токи и интервалы допустимых изменений напряженностей импульсных анодных полей, представляющих собой разность между напряженностью электрического поля, при которой получен максимальный автоэмиссионный ток, и пороговой напряженностью поля ($\Delta E = E_{max} - E_n$)

имеют экстремумы. Это означает, что начиная с некоторого сопротивления рост E_{max} замедляется. При напряжениях, превышающих E_{max} , происходит электрический пробой, который разрушает пленочные структуры.

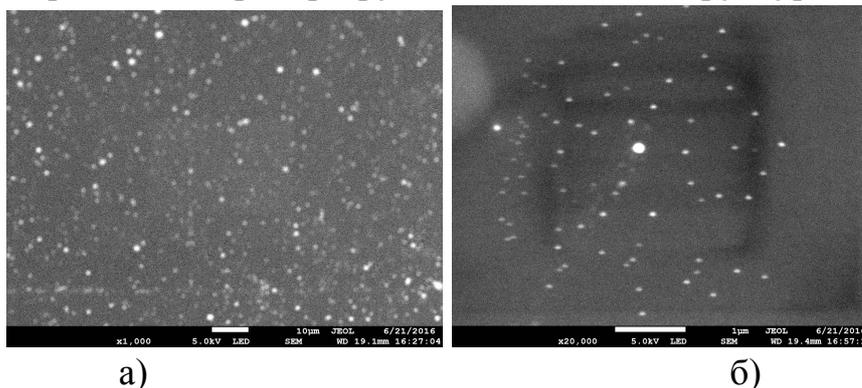


Рис. 1. СЭМ – изображения алмазграфитовых структур с поверхностной плотностью нанодiamond кристаллитов $10^6-10^8 \text{ см}^{-2}$ при различных увеличениях: а) $\times 1000$; б) $\times 20000$.

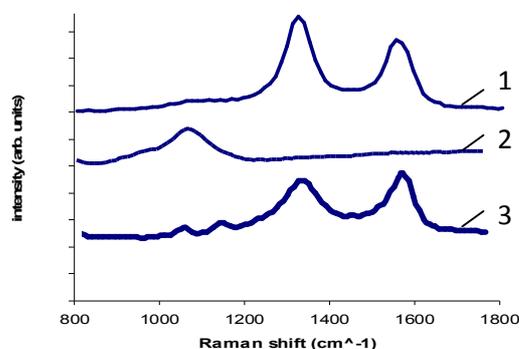


Рис. 2. Спектры КРС для алмазграфитовых (1), нанокристаллических алмазных (2) и графитоподобных (3) пленок.

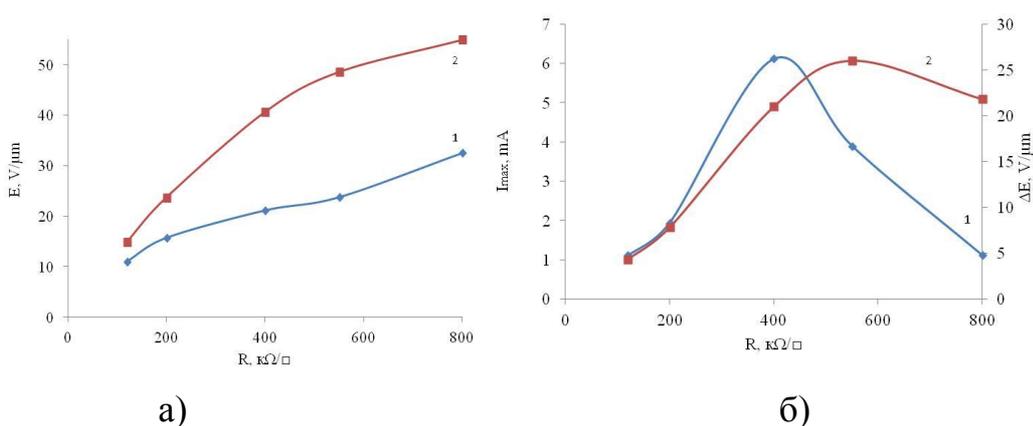


Рис. 3. Зависимости E_n (1) и E_{max} (2) полевой эмиссии электронов (а), а также максимальных автоэмиссионных токов (1) и интервалов допустимых изменений рабочих напряженностей импульсных анодных полей (2) (б) от поверхностных сопротивлений композитных углеродных структур.

Наиболее полно изучена автоэлектронная эмиссия из металлов в вакуум. При автоэмиссии из металлов ток j описывается формулой Фаулера – Нордгейма (ФФН) [6]:

$$J = A \frac{E_i^2}{\varphi} \cdot \exp(-B\varphi^{3/2}/E_i) \quad (1)$$

где A, B – некоторые коэффициенты, φ – потенциал работы выхода электрона из материала катода, E_i – электрическое поле на отдельном (усредненном) микровыступе, которое связано со средней величиной напряженности внешнего поля E_0 через коэффициент усиления K :

$$E_i = K \cdot E_0 \quad (2)$$

Таким образом, выражение (1) для зависимости $j(E)$ принимает вид:

$$J = A \cdot \frac{(E_0 \cdot K)^2}{\varphi} \exp\left(-B\varphi^{3/2}/(E_0 \cdot K)\right) \quad (3)$$

Рост плотности тока с повышением напряженности электрического поля E_0 заканчивается в металлах вакуумным пробоем и гибелью эмиттера. Этому предшествует более интенсивная, но кратковременная взрывная электронная эмиссия [7]. Аналогичные процессы наблюдаются в АЭК. Их разрушение происходит с кардинальными изменениями порога начала полевой эмиссии электронов и последующего предпробойного автоэмиссионного тока.

Основываясь на выражении (3), экспериментальные ВАХ можно аппроксимировать некоторыми экспоненциальными функциями вида:

$$J = C \exp(kx), \quad (4)$$

где C, k – коэффициенты, которые зависят от коэффициента усиления поля K и работы выхода, x – переменная величина, которая в импульсных электрических полях определяется амплитудой импульсов анодных напряжений. Коэффициент k , по существу, описывает крутизну экспоненты плотности автоэмиссионного тока, которая характеризует скорость нарастания тока в зависимости от амплитуды напряженности поля (рис. 4).

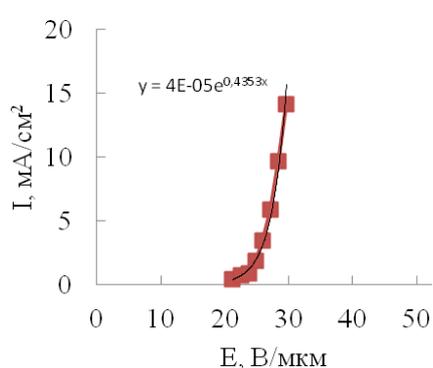


Рис. 4. Аппроксимации экспоненциальной функцией экспериментальной ВАХ планарной алмазографитовой пленочной структуры (точками представлены экспериментальные результаты).

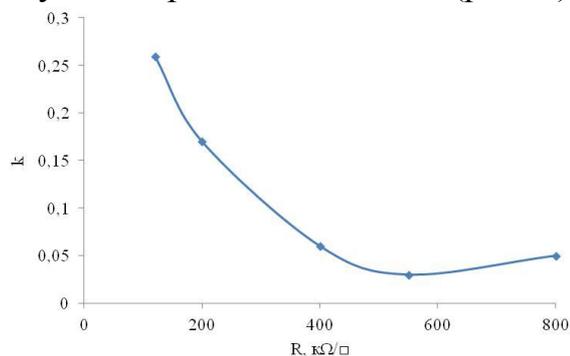


Рис. 5. Зависимость крутизны ВАХ от удельного поверхностного сопротивления алмазографитовых пленочных структур.

Аппроксимация экспоненциальной функцией экспериментальных ВАХ дает зависимость коэффициента k от поверхностного сопротивления, приведенная на рис. 5. Из сравнения этой зависимости с зависимостями на рис. 3 следует, что минимальный предпробойный автоэмиссионный ток реализуется при низких сопротивлениях, когда скорость его увеличения от напряженности анодного поля имеет наибольшее значение.

В сильных импульсных электрических полях дрейф электронов в твердом теле осуществляется с их разогревом. Небольшие сопротивления пленочных структур (100-200 кОм/□) оказывают меньшее влияние на рассеяние электронов на дефектах и колебаниях атомов кристаллической решетки и увеличение их дрейфовой скорости при увеличении поля. Это позволяет дрейфующим электронам при сравнительно небольшом увеличении напряженности анодного поля достичь энергии ионизации углеродных атомов и создать условия для разрушения катодной микроструктуры по механизму ударной ионизации [8]. Автоэмиссионные ВАХ таких структур характеризуются высокой крутизной и небольшим интервалом изменения напряженностей электрических полей. Увеличение сопротивления до 400 кОм/□, вследствие снижения подвижности электронов, замедляет нарастание энергии электронов, крутизна ВАХ уменьшается. До возникновения ударной ионизации имеется возможность повышения амплитуды импульсов электрических полей. Согласно ФФН, это приводит к увеличению максимальных автоэмиссионных токов.

При сопротивлениях больше 550 кОм/□ эффект от снижения энергии электронов делает возможным дальнейшее увеличение напряженности электрического поля. Увеличение возможно до тех пор, пока электрические поля в приповерхностной области АЭК, совместно с ударной ионизацией, не вызовут лавинообразный рост концентрации носителей заряда за счет эффектов Зинера и/или электростатической ионизации [8]. Это выражается в уменьшении допустимых интервалов напряженностей полей, небольшом увеличении крутизны ВАХ и уменьшении предпробойных токов.

Третья глава посвящена исследованию фундаментальных факторов, ограничивающих максимальную плотность тока, стабильность и долговечность АЭК на основе композитных алмазграфитовых структур.

На рис. 6 приведены конструкции планарно-торцевой и лезвийной алмазграфитовых эмиссионных структур на поликоровых подложках. Поверхностное сопротивление композитов составляло 120 кОм/□ и 1,2 МОм/□. Установлено, что для низкоомных АЭК после возникновения неустойчивости характерно появление на катодной части пленки «сетки», которая напоминает фигуры Лихтенберга (рис. 7а). Последние, как известно,

возникают на покрытиях при скользящих поверхностных электрических разрядах [9]. Размеры «сетки» в направлении от межэлектродного промежутка и напряженности полей начала автоэмиссии после электротеплового пробоя увеличиваются, что, вероятно, связано с ухудшением электропроводности катодной области, разрушением эмитировавших выступов и уменьшением коэффициентов усиления поля на оставшихся шероховатостях края.

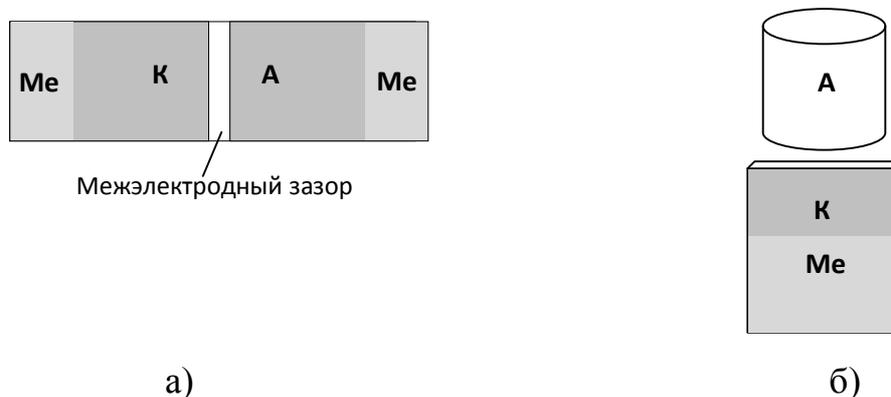


Рис. 6. Схемы планарно-торцевой (а) и лезвийной (б) эмиссионных структур: К – катод, А – анод, Ме – металлический контакт.

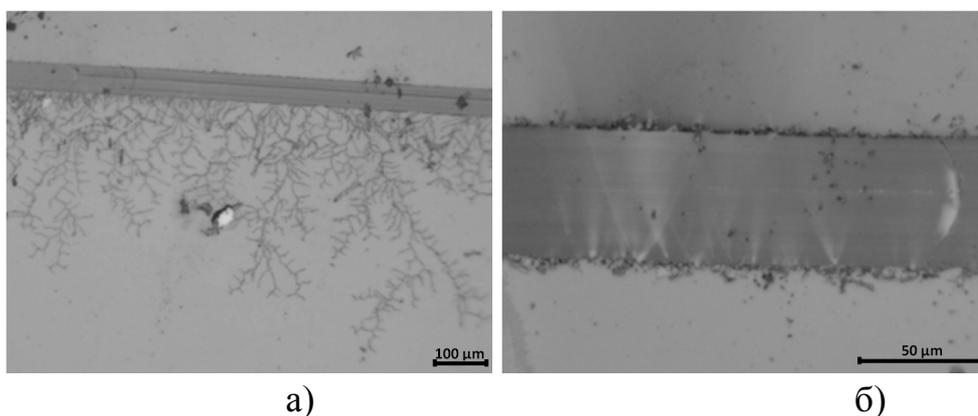


Рис. 7. Изображения участков разрушений катодных областей низкоомной (а) и высокоомной (б) алмазграфитовых пленочных структур при возникновении режимов неустойчивой автоэмиссии.

Для высокоомных АЭК при импульсном воздействии в экстремально сильном электрическом поле, приводящим к прекращению эмиссии, наблюдается появление следов эрозии в виде конусов, вершины которых находятся в катодной части пленки (рис. 7б). При этом уменьшается содержание углеродной фазы в зазоре в направлении от катода к аноду (области 8-10 на рис. 8б и фиг. 8-10 на рис. 8а). Вне эрозионных конусов углерод в межэлектродном зазоре имеет минимальные значения.

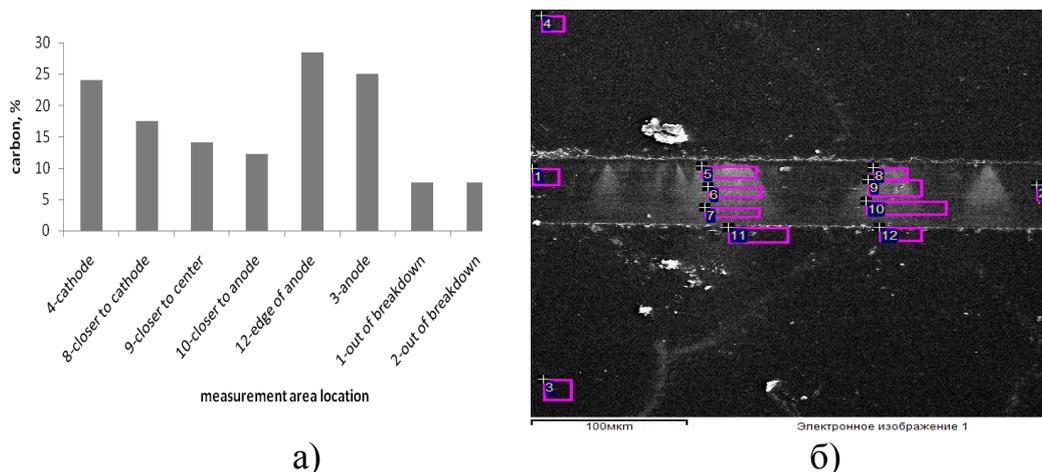


Рис. 8. Гистограмма распределения углеродной фазы по эрозионному конусу высокоомной планарно-торцевой алмазграфитовой автоэмиссионной структуры (а) с указанием областей проведения элементного анализа (б).

В лезвийном АЭК при превышении напряженности электрического поля 35 В/мкм наблюдается свечение вдоль торца алмазграфитовой пленки (рис. 9). При достижении автоэмиссионного тока 5,8 мА фиксировался самопроизвольный его рост при неизменном напряжении источника питания. Со временем скорость роста увеличивалась. За 5-7 мин. ток достигал величины около 10 мА. Одновременно с увеличением тока повышалось остаточное давление в измерительном вакуумном устройстве. При росте тока от 5,8 до 10 мА давление увеличилось с $3 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}$ Па. Последующее изучение элементного состава поверхности анода показало наличие на ней углеродной фазы.



Рис. 9. Катодное свечение при полевом токоотборе 1450 A/cm^2

Линейный характер автоэмиссионных ВАХ в координатах Фаулера и Нордгейма, полученных в режиме катодного свечения лезвийных АЭК позволяет заключить, что ток является полевым (рис. 10). Термоэмиссионная составляющая тока, несмотря на катодное свечение, не вносит значимого вклада в ВАХ.

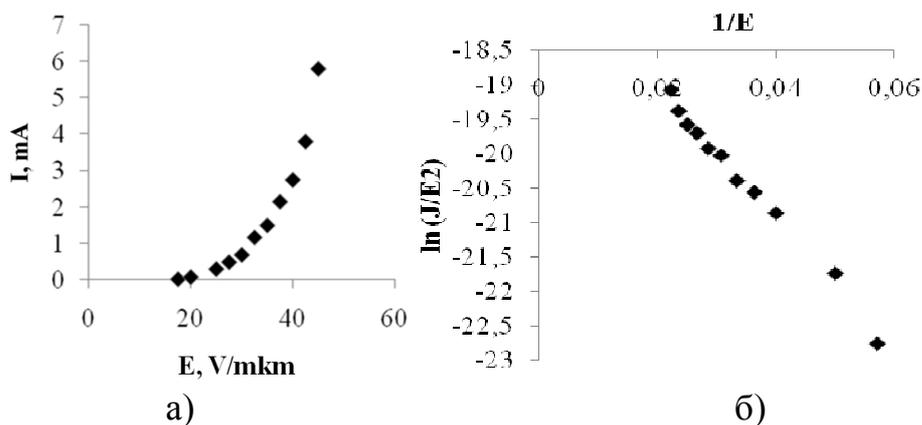


Рис. 10. Автоэмиссионные ВАХ лезвийного АЭК в режиме катодного свечения: *а* – в линейных; *б* – в координатах Фаулера-Нордгейма

В главе четыре исследованы долговременная воспроизводимость и стабильность характеристик стандартных МПК и алмазграфитового АЭК с плотностью тока более 100 A/cm^2 при нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации. Установлено, что МПК перестают эмитировать при давлении выше $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, тогда как у лезвийного АЭК границей является в разы более высокое давление (рис.11). При $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ для АЭК наблюдается падение тока примерно на 50%, а отсутствие эмиссии не отмечалось даже при $1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.

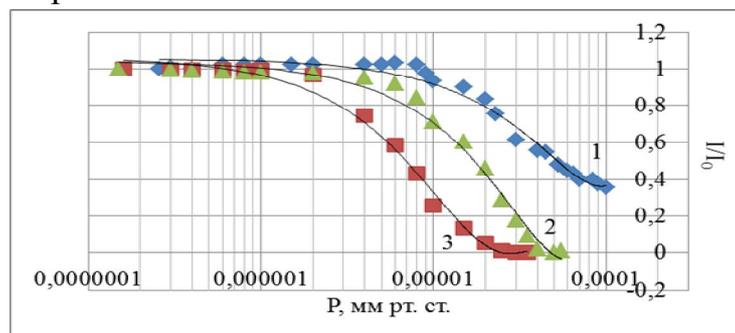


Рис. 11. Изменение относительной эмиссионной способности АЭК (1) и двух МПК (2,3) в зависимости от остаточного давления.

Напуск азота в вакуумную камеру с начальным давлением $2,6 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ до давления $8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ не является критичным для АЭК. При повышении давления азота до $1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ наблюдалось практически линейное уменьшение полевого тока. После откачки камеры до исходного вакуума полевой ток и крутизна ВАХ, по сравнению с теми же характеристиками АЭК до напуска азота, уменьшились, а порог начала эмиссии увеличился. Такая трансформация ВАХ может быть следствием увеличения поверхностного сопротивления эмиссионной структуры, обусловленная бомбардировкой высокоэнергетичными ионами азота с образованием нитридов углерода.

При испытаниях на долговременную воспроизводимость характеристик АЭК имитировались условия с отключением напряжения и средств откачки, которые состояли в следующем. После испытаний АЭК при давлении $9 \cdot 10^{-6}$ Па и заданном напряжении в течение определенного промежутка времени (от 0,5 до 3 часов в разных циклах) проводился замер ВАХ и отключение источника питания. После остывания измерительного устройства отключались средства откачки, в результате чего давление повышалось до 0,1 Па. Далее цикл испытаний с откачкой, подъёмом напряжения, выдержкой при заданном его значении и измерениями ВАХ повторялся.

На рис. 12 приведены изменения тока эмиссии и напряжения источника питания с нестабилизированным выходным напряжением в течение 8 циклов испытаний с суммарной длительностью свыше 13,5 часов. Можно видеть, что полевой ток, как и следовало ожидать согласно ФФН, очень чувствителен к нестабильности напряжения источника питания. При напряженности поля около 50 В/мкм и циклическом изменении вакуумных условий эксплуатации полевой ток изменялся в пределах от 6 до 8 мА, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора $1,3 \cdot 10^3$ А/см².

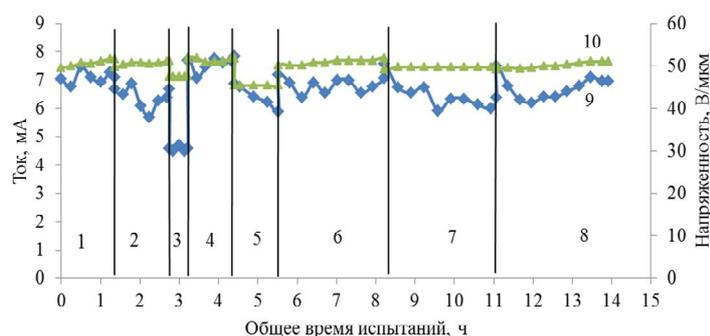


Рис. 12. Изменения полевого тока (9) и напряженности поля (10) в АЭК в течение 8 циклов долговременных испытаний (1-8- циклы испытаний)

Изучение элементного состава поверхности анода показало наличие на ней углеродной фазы. Для исследования ее свойств АЭК вновь был установлен в вакуумную камеру и проведен новый цикл испытаний. При подаче на анод отрицательного относительно АЭК напряжения в электрической цепи фиксировался ток, величина которого была соизмерима с ранее полученными токами эмиссии с катода. Однако автоэмиссионный ток анода не был стабильным. При напряженностях поля свыше 40 В/мкм происходили электрические микропробои, которых сопровождалось падением тока (рис. 13). До возникновения пробоев на ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма фиксировался линейный участок, который свидетельствует об автоэмиссионной природе тока с анода.

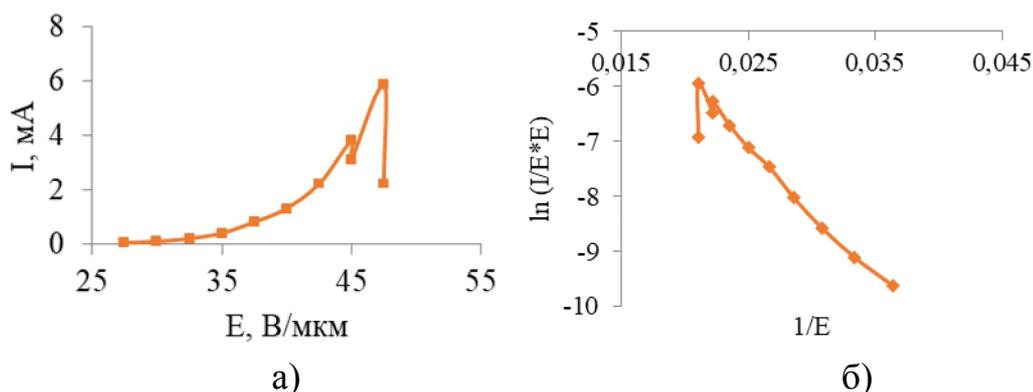


Рис. 13. ВАХ полевой эмиссии с анода в линейных координатах (а) и в координатах Фаулера-Нордгейма (б).

Последующее прямое включение диодной структуры показало улучшение эмиссионной способности АЭК. Положительный эффект проявлялся в снижении порога начала полевой эмиссии и повышении крутизны ВАХ (рис.14). Это может быть следствием улучшения поверхностной микроструктуры алмазграфитовой пленки в результате осаждения на ее поверхности высокопроводящей sp^2 углеродной фазы.

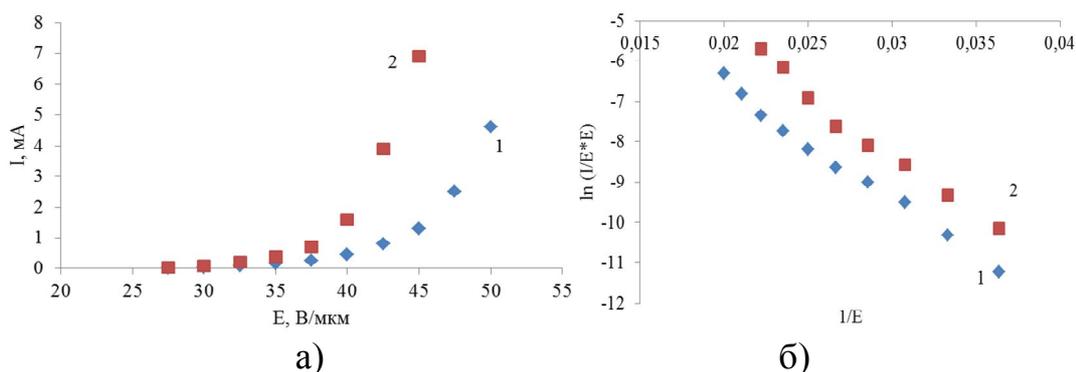


Рис. 14. ВАХ АЭК в линейных (а) и в координатах Фаулера-Нордгейма (б) до (1) и после (2) переосаждения углеродной фазы с анода на катод.

Пятая глава посвящена разработке технологического процесса получения и исследованию низкоэмиссионных углеродных покрытий для мощных ЭВП СВЧ. В качестве низкоэмиссионного покрытия использовались графитоподобные углеродные пленки (кривая 3 на рис. 2) (рис. 15). Полученные покрытия обрабатывали в СВЧ плазме, где в качестве рабочего использовался фторсодержащий газ CF_4 . Оптимальная длительность обработки составляла 5 минут при давлении 0,1 Па и потенциале смещения -300 В. Исследования эмиссионных свойств покрытий проводились в ЭВП СВЧ с КСУ на основе двух сеток - управляющей и теневой.

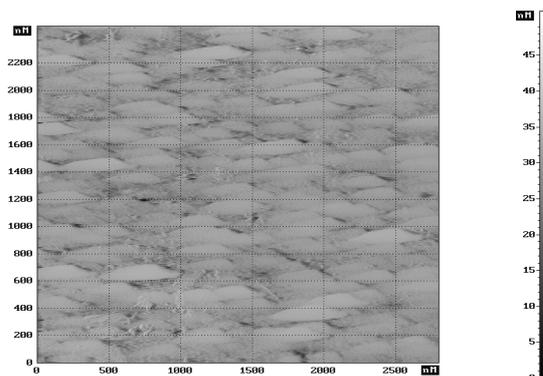


Рис. 15. Изображение в сканирующем туннельном микроскопе поверхности науглеродной sp^2 пленки со «слоевым» ростом и «нормальным» потенциалом работы выхода электронов

Предложена методика измерения эмиссионной способности сеток с последовательностью циклов, в каждом из которых температура МПК увеличивалась от 950 °С до 1200 °С с последующей выдержкой при этой температуре от 0,5 до 15 часов. При подаче переменного напряжения между катодом и разогретой сеткой с осажденными на ней примесными добавками МПК, когда на сетке положительная относительно катода полярность, величина тока фиксировалась одним из измерителей тока. При изменении полярности осуществлялась термоэмиссия с сетки на катод. Ток фиксировался измерителем тока 5 (рис. 16).

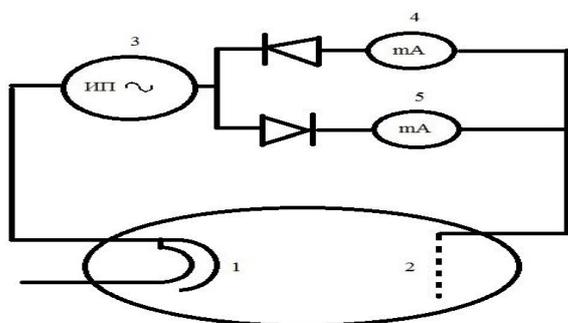


Рис. 16. Электрическая схема для измерения термоэмиссионных токов управляющей сетки: 1- МПК, 2- сетка, 3- источник питания нити накала МПК, 4,5- стрелочные измерители тока.

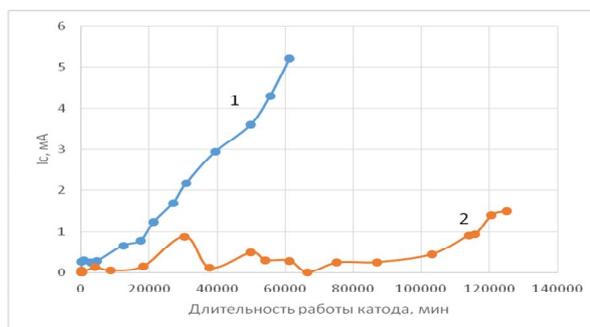


Рис. 17. Зависимости токов эмиссии сеток от длительности испытаний: 1 - типовая конструкция КСУ; 2 – конструкция КСУ с углеродным покрытием

Установлено, что эмиссионный ток управляющей сетки с углеродным покрытием более, чем в три раза меньше, по сравнению с током сетки типовой конструкции КСУ, полученным при меньшей в два раза

длительности испытаний (рис.17). При длительности испытаний, соответствующей стандартной долговечности МПК, различие в токах превышало один порядок. Зависимость тока эмиссии сеток с углеродным покрытием, в отличие от сеток из гафния типового КСУ, имеет немонотонный характер с большей длительности участка с нулевым эмиссионным током.

Для углеродных покрытий после их плазмохимической модификации в CF_4 произведен расчет изменения работы выхода электронов с использованием выражения (3) по формуле:

$$\varphi_2 = \varphi_1 (K_2 * \operatorname{tg} \alpha_2 / K_1 * \operatorname{tg} \alpha_1)^{\frac{2}{3}}, \quad (5)$$

где: φ_1 – работа выхода электронов углеродных структур до плазмохимической обработки в CF_4 ($\varphi_1 = 4,6$ эВ); K_1 и K_2 - коэффициенты усиления электрического поля на остриях поверхностей углеродных структур до и после плазмохимической обработки в CF_4 , соответственно, α_1 , α_2 – углы наклона линейных ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма до и после плазмохимической обработки пленочных структур в CF_4 , соответственно.

Оценка коэффициентов усиления поля на остриях поверхностей углеродных пленок осуществлялась с использованием АСМ и функции Threshold его программного обеспечения.

На рис. 18, 19 приведены АСМ изображения морфологий и распределений поверхностных плотностей высот острий углеродной структуры с поверхностным сопротивлением 110 кОм/□ до и после обработки в плазме CF_4 . Коэффициенты усиления поля K , представляющими собой отношение высот острий к радиусу закругления их вершин, имеют значения, соответственно, $10-20$ до обработки в плазме CF_4 и $25-50$ после обработки. Эти значения K использованы для определения работы выхода электронов из ВАХ построенных в координатах Фаулера и Нордгейма (рис. 20). Расчеты с $K_1 = 15$ до обработки в плазме CF_4 и после нее ($K_2 = 30$) показали ее увеличение от $4,6$ эВ до $5,2$ эВ после обработки в плазме CF_4 .

При обработке углеродных покрытий, осажденных на управляющую сетку, в высокоионизированной микроволновой плазме фторсодержащей газовой среды (CF_4) химически активными частицами являются ионы CF_n^+ , где $n = 0...4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора. При хемосорбции на углеродном покрытии они образуют адкомплексы $C = CF_m$, где $m = 1...3$ [5]. Адкомплексы пассивируют оборванные в результате ионной бомбардировки химические связи поверхностных атомов углеродного покрытия. Ввиду высокой электроотрицательности атомов фтора результатом пассивации является увеличение суммарного дипольного

момента поверхности. Дипольный момент, вызванный адсорбатом, направлен от поверхности покрытия в вакуум и приводит к увеличению работы выхода электронов.

Плазменное фторирование углеродных покрытий, одновременно с увеличением работы выхода электронов, уменьшает вероятность прилипания термически испаренных атомов легирующих примесей МПК. Последнее обусловлено низкой электронной поляризуемостью комплексов CF_m и, как следствие, низкими поверхностной энергией покрытия и диполь – дипольного взаимодействия Ван-дер-Ваальса при адсорбции [10]. Это уменьшает время жизни адатомов термически распыленных активных примесей МПК при рабочих температурах и скорость формирования на их основе фазы, которая снижает работу выхода электронов материала управляющей сетки (рис.17, кривая 2). Благодаря этим факторам замедляются изменения термо и вторичной электронной эмиссия углеродных покрытий КСУ, увеличивается КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных ЭВП.

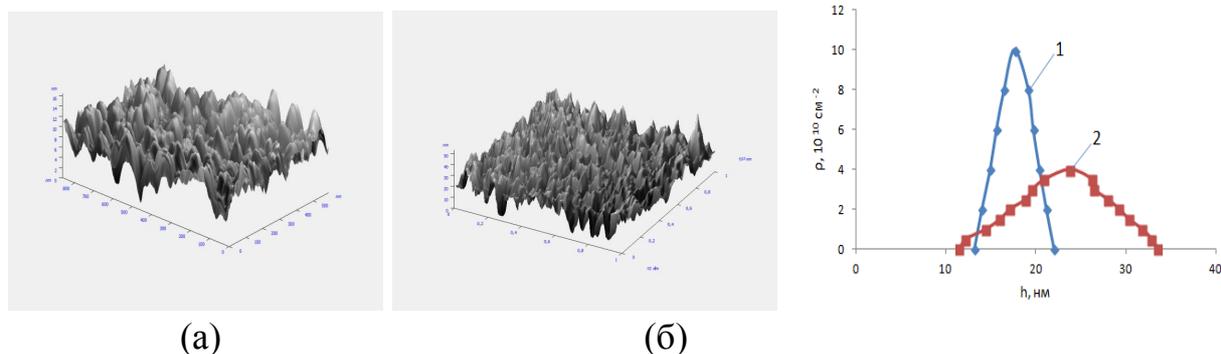


Рис. 18. АСМ изображения углеродной пленочной структуры до (а) и после обработки в плазме CF_4 (б).

Рис. 19. Поверхностные плотности высот выступов углеродной пленки до (1) и после (2) обработки в плазме CF_4

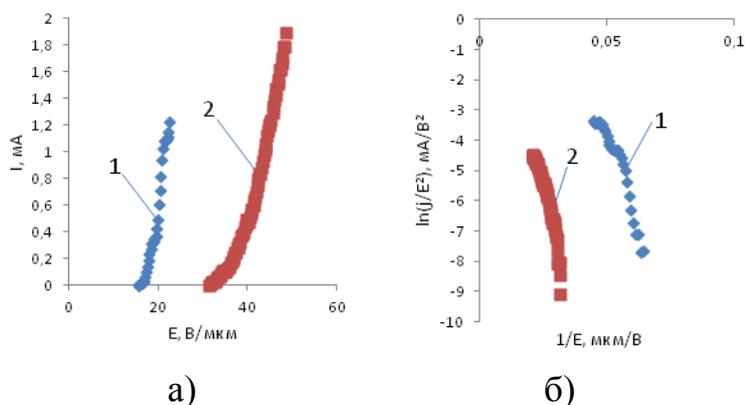


Рис. 20. ВАХ углеродной структуры в линейных (а) и Фаулера-Нордгейма (б) координатах: 1 – до обработки; 2 – после обработки в плазме CF_4 .

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. С использованием микроволновой плазмы паров этанола низкого давления определены области режимов, обеспечивающих получение композитных нанокристаллических пленочных структур, содержащих алмазную и графитовую фазы в различных объемных соотношениях с поверхностной плотностью наноалмазных кристаллитов до $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$.

2. Разработаны технология получения и исследованы закономерности взаимосвязей автоэмиссионных характеристик источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур с их электрофизическими свойствами. Установлены закономерности взаимосвязей максимальных автоэмиссионных токов со скоростью их увеличения в зависимости от напряженности анодных электрических полей, а также интервалов допустимых изменений рабочих напряженностей импульсных электрических полей.

3. Установлено, что взаимосвязь между пороговыми напряженностями полевой эмиссии электронов в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности и удельными поверхностными сопротивлениями алмазографитовых композитов описывается законом Ома. Максимальные автоэмиссионные токи, характеризующие переход от режима устойчивой эмиссии к взрывной эмиссии, зависят от поверхностного сопротивления углеродных пленочных композитов и имеют максимум при определенных его значениях. В низкоомных пленочных структурах основным механизмом разрушения катодных структур является ударная ионизация, в высокоомных – эффект Зинера.

4. Наиболее высокая крутизна автоэмиссионных ВАХ, обеспечивающая повышенное быстродействие полевых источников электронов в устройствах СВЧ и субтерагерцового диапазонов, реализуется в полевых источниках электронов на основе алмазографитовых пленочных композитов с высокой поверхностной электропроводностью.

5. С увеличением удельных поверхностных сопротивлений алмазографитовых пленочных структур увеличивается устойчивость сильноточной полевой эмиссии электронов АЭК. Наиболее устойчивыми к возникновению взрывной эмиссии являются катодные матрицы, которые имеют максимальные автоэмиссионные токи при небольшой крутизне ВАХ.

6. Установлен различный характер вакуумно-плазменных процессов при экстремальной полевой эмиссии алмазографитовых АЭК с различным поверхностным сопротивлением. В низкоомных АЭК в экстремальных режимах эксплуатации сильноточных планарно-торцевых структур

основными причинами нестабильности параметров эмиссии и разрушения является возникновение на катоде «сетки» электротепловых пробоев, характерных для диэлектрических покрытий при протекании скользящего поверхностного электрического разряда. В высокоомных структурах, также как для сильноточных лезвийных АЭК, основным характером разрушения является эрозия катодной области. Эрозия обусловлено процессами взрывной эмиссии электронов, которая осуществляется с возникновением факелов катодной плазмы и распылением графитовой компоненты материала катода на анод и в межэлектродный промежуток.

7. Преимуществом алмазграфитовых АЭК с плотностью тока более 100 A/cm^2 перед МПК при долговременных нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации является высокая устойчивость автоэмиссионных характеристик в более широком интервале изменений давления в приборе. Это улучшает эксплуатационные характеристики СВЧ устройств в отсутствие встроенных средств откачки.

8. Установлен эффект улучшения эмиссионной способности алмазграфитового АЭК после переосаждения на него с анода распыленного с АЭК материала, которое реализуется изменением полярности напряжения в межэлектродном зазоре. Эффект может быть использован для улучшения эмиссионных характеристик АЭК, а также для восстановления его эмиссионной способности при долговременной работе устройств СВЧ.

9. Разработан технологический процесс получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий с повышенной работой выхода вторичных электронов и низкой скоростью термического осаждения на них активных примесных добавок МПК КСУ мощных СВЧ устройств.

10. Показано, что плазменное фторирование графитоподобных углеродных пленок увеличивает работу выхода электронов от исходных 4,6 эВ до 5,2 эВ после обработки в плазме CF_4 . При одинаковой длительности испытаний, соответствующей стандартной долговечности МПК ЭВП СВЧ, ток с управляющей сетки с углеродным покрытием уменьшался более, чем на порядок, по сравнению с током сетки типовой конструкции КСУ.

11. Предложены физико-химические механизмы формирования антиэмиссионных свойств углеродных покрытий с плазменным фторированием поверхности.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. Yafarov R. K., Storublev A. V. Stability of the Emission Characteristics of Thermal and Cold-Field Cathodes Operating in a Vacuum. // Russian microelectronics. 2021. Vol. 50, No. 2. P. 102-107.

2. Yafarov R. K., Nefedov D. V., Storublev A. V. Vacuum-plasma processes at extreme field emission in diamond electron sources. // Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics, 2021, vol. 21, iss. 1, pp. 69–79.

3. Яфаров Р. К., Сторублев А. В. Долговременная воспроизводимость эмиссионных характеристик алмазграфитовых полевых источников электронов в нестационарных вакуумных условиях эксплуатации // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 24. С. 17-19.

4. Yafarov R. K., Storublev A. V. Durability of High-Current Field Sources of Electrons Based on Nanocomposite Diamond-Graphite Film Structures // Russian Microelectronics, 2022, Vol. 51, No. 2, pp. 54–58.

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

5. Крачковская Т.М., Сторублев А.В., Сахаджи Г.В., Емельянов А.С. Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного наноуглеродом // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 57-63.

6. Сахаджи Г.В., Крачковская Т.М., Журавлев С.Д., Сторублев А.В. Скандиевый катод: определение направления развития оптимальной технологии изготовления // Радиотехника. 2017. № 7. С. 60-63.

Патенты РФ:

7. Горева Т.А., Золотых Д.Н., Сторублев А.В., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионным катодом. Патент на изобретение RU 2713381 С1, 05.02.2020.

8. Сторублев А.В., Крачковская Т.М., Сахаджи Г.В. Способ измерения рабочей температуры катода в составе электронного прибора. Патент на изобретение RU 2713229 С1, 04.02.2020. Заявка № 2019108346 от 21.03.2019.

Публикации в других изданиях:

9. Яфаров Р.К., Сторублев А.В. Восстановление долговременной эмиссионной способности сильноточных полевых алмазграфитовых катодов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей VIII Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2021. С. 246-250.

10. Яфаров Р.К., Сторублев А.В. Особенности долговременной эксплуатации углеродных автокатодов в нестационарных температурно-вакуумных условиях // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2021. Т. 1. С. 567-571.

11. Яфаров Р.К., Сторублев А.В., Новиков П.Е. Катодное распыление при сильноточной полевой эмиссии в алмазграфитовых источниках электронов // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей седьмой Всероссийской научной школы-семинара. Саратов, 2020. С. 133-137.

12. Яфаров Р.К., Сторублев А.В., Захаревич А.М., Нефедов Д.В. Исследование элементного состава следов катодного факела в сильноточных наноалмазграфитовых полевых источниках электронов // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 2020. С. 182-183.

13. Storublev A.V. The study of diamond-graphite film structure on the emission under conditions designed to thermionic cathodes. В сборнике: Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science. Материалы IX научной конференции молодых ученых. 2019. С. 164-170.

14. Krachkovskaya T.M., Storublev A.V., Sahadji G.V., Emelyanov A.N. Performance investigation for nanocarbon modified dispenser cathode. // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 57.

15. Крачковская Т.М., Сторублев А.В., Сахаджи Г.В., Емельянов А.С. Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного нанокремнеземом. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 155-159.

16. Яфаров Р.К., Сторублев А.В., Яфаров А.Р. Влияние высокодозного ионного облучения на автоэмиссионные свойства алмазграфитовых пленочных структур. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 625-629.

Список цитированной литературы

1. Фурсей Г. Н., Поляков М. А., Кантонистов А. А., Яфясов А. М., Павлов Б. С., Божевольнов В. Б. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 6. С. 71–77.

2. Гуляев Ю. В., Абанышин Н. П., Горфинкель Б. И., Морев С. П., Резчиков А. Ф., Сеницын Н. И., Якунин А. Н. Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 11. С. 63–70.

3. Яфаров Р.К., Шаныгин В.Я., Нефедов Д.В. Алмазграфитовый нанокompозит для сильноточной полевой эмиссии электронов // Докл. VI Всерос. микроволновой конф. М. 2018. С. 142.

4. Бабанов Ж.Н., Козлов Б.И., Андреев А.А. К вопросу о подавлении термоэлектронной эмиссии с сеток электровакуумных приборов. // Электронная техника. Серия 6 «Материалы». 1980. Вып. 8(320). С. 14-17.
5. Яфаров Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
6. Fowler, R.H. Electron emission in intense electric fields / R.H. Fowler, L. Nordheim // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1928. – Vol. 119, No 781. – P. 173–181.
7. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия. М.: «Физматлит, 2011. 280 с.
8. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 672 с.
9. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. 2-е изд. М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. – 836 с.
10. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.

Сторублев Антон Вячеславович

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НАНОУГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ
СВЧ И СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Подписано в печать 2022 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. - печ. л. 1,0

Тираж 100 экз. Заказ № 18.

Издательство «Саратовский источник»

Отпечатано в типографии «Саратовский источник»
Саратов, ул. Кутякова, 138 б, 3 этаж. Тел.: 8452 52-05-93,
e-mail: saristoch@bk.ru