

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского»

На правах рукописи



Сторублев Антон Вячеславович

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор Яфаров Р.К.

Саратов 2022

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Принципы построения активных элементов эмиссионной микроэлектроники. Синтез и применение углеродных материалов в устройствах СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности	15
1.1 Принципы построения активных элементов для обработки радиоимпульсной информации	15
1.2 Получение углеродных материалов для высокоэмиссионных пленочных покрытий полевых источников электронов	20
1.3 Модели механизмов автоэлектронной эмиссии	26
1.4 Механизмы возникновения вторичной эмиссии электронов и способы совершенствования КСУ электронных пушек СВЧ ЭВП	32
1.5 Выводы к главе 1 и постановка задачи	37
Глава 2 Получение наноалмазографитовых структур и исследование воздействия их электрофизических параметров на автоэлектронную эмиссию.....	40
2.1 Синтез и электрофизические свойства наноалмазографитовых тонкопленочных композитов	40
2.2 Механизм формирования композитных алмазографитовых пленочных структур в микроволновой плазме паров этанола	43
2.3 Закономерности взаимосвязей электропроводности алмазографитовых композитов с автоэмиссионными ВАХ источников электронов на их основе ...	45
2.4 Механизмы, обеспечивающие взаимосвязи максимальных плотностей автоэмиссионных токов и крутизны ВАХ.....	50
2.5 Выводы к главе 2.....	51
Глава 3 Фундаментальные факторы, ограничивающие максимальную плотность тока, стабильность и долговечность композитных алмазографитовых АЭК.....	53
3.1 Состояние и перспективы использования лезвийных АЭК в устройствах суб- и терагерцовом диапазонах частот.....	53

3.2 Влияние электрофизических свойств алмазографитовых планарно-торцевых АЭЖ на характер их разрушений в экстремальных условиях эксплуатации.....	55
3.3 Вакуумно-плазменные процессы при экстремальной полевой эмиссии в лезвийных алмазографитовых источниках электронов	61
3.4 Выводы к главе 3.....	64
Глава 4 Эмиссионные характеристики источников электронов на основе алмазографитовых полевых катодов и их долговременная воспроизводимость ...	66
4.1 Исследование долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик МПК и сильноточных алмазографитовых АЭЖ с плотностью тока не менее 100 А/см^2	66
4.2 Исследование долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик сильноточных алмазографитовых АЭЖ с аварийным отключением питающего напряжения и средств откачки	71
4.3 Восстановление эмиссионной способности алмазографитовых АЭЖ после долговременной эксплуатации со сверхвысокими плотностями полевых токов	75
4.4 Выводы к главе 4.....	79
Глава 5 Разработка технологии получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий КСУ мощных ЭВП с МПК	81
5.1 Получение и исследование антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий	81
5.2 Разработка методики измерения термоэмиссии управляющей сетки КСУ МПК мощных ЭВП	85
5.3 Термоэмиссия управляющей сетки с фторированным углеродным покрытием.....	91
5.4 Физико-химические механизмы формирования антиэмиссионных свойств углеродных покрытий с плазменным фторированием поверхности	94
5.5 Выводы главы 5	97
Основные выводы и результаты работы.....	99
Список литературы	102

Введение

Актуальность работы обусловлена развитием адаптивных возможностей общества, связанных с созданием и непрерывным совершенствованием систем спутниковой связи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия и прочим. Их совершенствование основывается на трех главных показателях: увеличении частотного диапазона и выходной мощности, снижении времени готовности. Приборы СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и большой мощности широко применяются в воздушно-космических и наземных радиотехнических устройствах. В связи с этим, освоение диапазона электромагнитных волн между микроволновым и инфракрасным (100 ГГц и выше) является одной из важнейших задач электроники. Применение терагерцовых (ТГц) источников излучения представляется перспективным для таких сфер деятельности как медицина, спектроскопия, беспроводные информационно-коммуникационные системы высокоскоростной передачи данных, а также системы безопасности, включая противодействие терроризму в области дистанционного обнаружения взрывчатых веществ. Освоение ТГц диапазона осуществляется с помощью приборов твердотельной либо вакуумной эмиссионной электроники. Однако, ограничения на реализуемую мощность, приборные проявления которых известны как «терагерцовая яма», позволяют при реализации силовых устройств отдать предпочтение приборам вакуумной эмиссионной электроники. Не вызывает сомнений, что для достижения уровней мощности порядка десятков ватт и выше оптимальными являются миниатюрные аналоги «классических» приборов вакуумной СВЧ электроники: ламп бегущей и ламп обратной волны. Для них требуется постоянное совершенствование эксплуатационных характеристик. Все более высокие требования по надежности и долговечности предъявляются, в частности, к радиоаппаратуре, используемой для систем навигации и космической связи.

Одним из наиболее критических параметров при эксплуатации сверхвысокочастотных устройств справедливо считается, так называемое, время готовности, которое определяется как промежуток времени между включением прибора и до выхода на рабочий режим. В настоящее время, в большинстве устройств, время готовности достигает порядка нескольких минут. Это время необходимо для разогрева катода в приборах, работающих на эффекте термоэлектронной эмиссии.

В связи с вышесказанным и повышенными требованиями к характеристикам устройств специального назначения, очень актуальной задачей является перевод СВЧ устройств на полевые катоды, позволяющие реализовать безнакальный режим работы. Переход к холодным катодам, работающим на эффекте автоэлектронной эмиссии, позволяет обеспечить практически мгновенную готовность к началу работы радиотехнических систем стратегического назначения. В настоящее время большую актуальность имеют работы [1], направленные на создание элементной базы вакуумной микроэлектроники и полевых катодов с высокой токоотдачей, которые могут быть применены в генераторах сверхвысокочастотного и субтерагерцового диапазонов. Такой интерес связан с тем, что устройства, функционирующие на автоэмиссионном эффекте, обладают высокой радиационной стойкостью и крайне высоким быстродействием [2]. Автоэмиссионные катоды (АЭК), по сравнению с термоэлектронными катодами, помимо малого времени готовности, обладают еще такими преимуществами, как меньшие размеры и более низкое потребление энергии.

Необходимость получения электронных пучков со сверхвысокими плотностями тока – это основная проблема, с которой сталкиваются при создании мощных источников когерентного субтерагерцового излучения. Это обусловлено уменьшением размеров приборов. Перспективным направлением их разработки является применение сильноточных полевых катодов. Их преимущества перед другими источниками электронов хорошо известны. Однако, несмотря на

значительные усилия ученых многих стран мира и достижения в технологии твердотельной микроэлектроники, до сих пор не удалось достичь существенного прогресса в создании приборов на основе 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 [3-7].

Формирование нанокompозитных алмазографитовых тонкопленочных структур с различным содержанием алмазной и графитовой компонент, было описано в работах [8, 9]. Они были получены из паров этанола, разложением в СВЧ плазме низкого давления. Благодаря варьированию технологических параметров в широких пределах, возможен синтез углеродных структур со сниженным порогом начала эмиссии и плотностью тока более 100 А/см^2 , полученной при приложении импульсов микросекундной длительности.

Несмотря на полученные сверхвысокие плотности автоэмиссионных токов, которые более чем на порядок превышают лучшие мировые достижения в области эмиссионной электроники, остается еще достаточно много вопросов, которые требуют своего исследования для того, чтобы уверенно рекомендовать полевые источники электронов на основе композитных алмазографитовых 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 электронных пучков 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. Ключевым условием, предъявляемым к металлопористым катодам, применяемым в мощных СВЧ приборах, является увеличение плотности тока, что достигается повышением рабочей температуры, а это приводит к росту скорости испарения активного вещества с катодного узла МПК, с последующим переносом его на элементы вакуумного прибора, в том числе и на управляющую сетку. Вследствие непрерывного напыления активного вещества и радиационного нагрева от термокатода и токоперехвата сетка сама становится эмитирующим элементом. Паразитная термоэмиссия сетки, усиленная ее вторичной эмиссией, снижает качество запирающего электронного потока в промежутке между импульсами. Это ухудшает рабочие характеристики устройств и снижает долговечность работы МПК и прибора в целом.

Перспективным материалом антиэмиссионных покрытий, которые могут подавлять эмиссию с сеток КСУ, является углерод. Получение низких коэффициентов вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) достигается за счет создания развитого рельефа на поверхности углеродной пленки. Однако такие покрытия обладают повышенной адсорбционной способностью вследствие быстрой термализации испаренных с МПК атомов активных примесей. Это приводит к постепенному «зарастанию» микрорельефа и ухудшению КВЭЭ в процессе эксплуатации мощных генераторных ламп. В связи с этим разработка новых низкоэмиссионных покрытий для мощных СВЧ устройств на основе МПК продолжает оставаться в центре внимания разработчиков [10, 11].

В связи с изложенным, тема диссертационной работы, направленная на получение и исследование функциональных покрытий на основе углеродных пленочных композитов для СВЧ и субтерагерцовой вакуумно-плазменной электроники, является актуальной и своевременной.

Цель работы. Совершенствование технологии производства и характеристик полевых источников электронов и катодно-сеточных узлов устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности.

Основные задачи работы:

1. Разработать технологические методики получения сильноточных полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схемотехническим 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 автоэмиссионных характеристик алмазграфитовых катодных структур, функционирующих в нестабильных вакуумно-температурных условиях, с токомбором не менее 100 А/см².

4. Разработать технологический процесс 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 ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов.

Методы исследований. Для получения пленочных алмазграфитовых композитов с различными электрофизическими свойствами использовалась вакуумная установка с безмасляной системой откачки и неравновесной 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 эффекта поля, методов атомно-силовой и электронной

микроскопии, рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света (КРС), других методов. Элементный состав поверхностей исследовался с помощью системы энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350, установленной на сканирующем микроскопе MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan. Чувствительность детектора микроанализа составляет $133 \text{ эВ}/10^{-5} \text{ м}^2$, что достаточно для анализа химических элементов от Be до Pu. Для исследования автоэлектронной эмиссии диодная структура размещалась в вакууме (10^{-6} Па), где к ней прикладывались, как постоянные электрические поля, так и импульсные с длительностью импульсов в десятки микросекунд. Вакуумный промежуток, установленный между катодной частью диодной структуры и анодом, имел значение около 40 мкм, а точность установки расстояния составляла 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 тонкопленочных планарно-торцевых алмазографитовых структур, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям.
3. Установлено, что наноалмазографитовые композиты с низким сопротивлением, по сравнению с высокоомными структурами, демонстрируют более сильную крутизну вольт-амперной характеристики. Они имеют более низкий порог начала полевой эмиссии и обеспечивают достижение максимального эмиссионного тока при меньшей напряженности электрического поля. Эмитирующие структуры с высоким сопротивлением для получения такого же тока, как в низкоомных

структурах, могут иметь в разы более широкий диапазон рабочих напряжений. 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 ЭВП, увеличивает работу выхода электронов и при одинаковой длительности ускоренных испытаний с ЭВП СВЧ без углеродного покрытия на управляющей сетке уменьшает более чем на порядок, их эмиссионные токи, позволяет в разы увеличить долговечность ЭВП.

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

1. На основе тонкопленочных наноалмазграфитовых композитов разработаны технологии получения автоэмиссионных лезвийных и планарно-торцевых источников электронов, обеспечивающих реализацию различных схемотехнических решений.

2. Установлено, что металлопористые катоды в нестабильных вакуумных условиях продолжительной эксплуатации обладают хорошей способностью к восстановлению эмиссии после последующей откачки до первоначального рабочего давления. Достоинством алмазграфитовых АЭК является устойчивость эмиссионных характеристик в более широком интервале изменений рабочего давления, что повышает эксплуатационные свойства вакуумных приборов, не снабженных дополнительными средствами вакуумной откачки.

3. Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик сильноточных полевых алмазграфитовых катода 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

нестабилизованного 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. Испытания не выявили деградации эмиссионных характеристик алмазографитового АЭК.

4. Предложен способ восстановления эмиссионной способности алмазографитовых 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 ЭВП, 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 эмиссии в КСУ, увеличивается КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных ЭВП.

Научные положения, выносимые на защиту:

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

2. Долговременная эксплуатация сильноточных АЭК на основе алмазографитовых 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 ЭВП не изменяет туннельный механизм эмиссии электронов алмазграфитовых АЭК, однако приводит к изменению автоэмиссионных ВАХ. 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, напротив, увеличивается.

4. Дипольная поляризация с использованием микроволнового плазмохимического фторирования углеродных покрытий, осажденных на управляющие сетки мощных СВЧ ЭВП, 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 ЭВП.

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), восьмой Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2021 г. (г. Саратов), седьмой Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2020 г. (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 работ по грантам РФФИ № 19-38-90216 и РНФ № 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.

Глава 1 Принципы построения активных элементов эмиссионной микроэлектроники. Синтез и применение углеродных материалов в устройствах СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности

1.1 Принципы построения активных элементов для обработки радиоимпульсной информации

Важнейшим направлением развития СВЧ электроники является вакуумная микроэлектроника и вакуумные интегральные схемы (ВИС). Ближайшими конкурентами ВИС, предназначенными для усиления, переключения или модуляции высокочастотных электрических сигналов, являются твердотельные МДП структуры, работа которых основана на изменении проводимости полупроводника под действием электрического поля с напряжением меньше 10 В. Благодаря простоте изготовления, низкой стоимости в результате групповой обработки и энергопотреблению, кремниевые МДП структуры занимают ведущее положение в современной микро- и наноэлектронике. Однако, по ряду принципиальных характеристик, они значительно уступают активным элементам, в которых вместо твердого тела используется вакуум [12].

Основными достоинствами вакуумных микроэлектронных устройств на основе твердотельных полевых источников электронов являются сверхвысокое быстродействие, большие плотности токов и возможность эксплуатации в экстремальных условиях, связанных с высокой температурой и воздействием различных излучений. Вакуум по своей природе превосходит твердое тело в качестве среды для транспорта носителей заряда. Он имеет электрическую прочность, которая многократно превышает электрическую прочность полупроводниковых структур и допускает баллистический транспорт, в то время как в полупроводниках носители зарядов рассеиваются на дефектно-примесных

центрах, оптических и акустических фонах. Скорость электронов в вакууме теоретически составляет $3 \cdot 10^{10}$ см/с, в то время как в полупроводниках она ограничена тепловой скоростью, которая не превышает $5 \cdot 10^7$ см/с. Эти свойства вакуума позволяют создавать силовые вакуумные устройства с более высокими частотой и выходной мощностью, которые не достижимы в твердотельных ИС. С другой стороны, при уменьшении вакуумного промежутка между эмиттером и коллектором электронов до нанометровых размеров рабочие напряжения ВИС могут быть уменьшены до величин сравнимых с полупроводниковыми устройствами. При длине вакуумного канала меньше длины свободного пробега электронов, требование вакуума ослабляется, и напряжение автоэлектронной эмиссии снижается до значения, меньшего, чем потенциал ионизации молекул в воздухе. В принципе, это позволяет ВИС работать даже в атмосферных условиях.

Приборы вакуумной микроэлектроники могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового диапазона длин волн, в системах непосредственного телевизионного вещания со спутников с использованием тридцатисантиметровых антенн и менее, в РЛС, телефонных системах сотовой связи и т. п. В последние десятилетия практически во всех ведущих странах мира проводятся интенсивные работы, направленные на изучение возможности построения принципиально новых ВИС для обработки радиоимпульсной информации в СВЧ и субтерагерцовом диапазонах, а также миниатюрных приборов средней мощности для ВИС.

Для вакуумных интегральных схем, СВЧ приборов, плоских дисплеев весьма привлекательными по ряду причин, прежде всего миниатюрности, экономичности и т.п., являются матричные автоэмиссионные катоды, в которых эмиссия происходит с кончиков регулярного массива острий. Острия могут быть выполнены с помощью различных технологий, включающих процессы фотолитографии, травления, напыления, окисления, как с интегрированным управляющим электродом, например, катоды Спиндта, так и без него. Ключевыми параметрами катодов являются величина плотности тока, ее однородность по

площади и стабильность во времени. Эти параметры в первую очередь связаны с плотностью упаковки острий и однородностью тока эмиссии по массиву острий, которая в свою очередь обусловлена степенью идентичности геометрических и электрических параметров острий в массиве. Неоднородность параметров острий приводит к разбросу электрического поля на их окончаниях и тока эмиссии от острия к острию из-за сильной зависимости тока автоэмиссии от величины электрического поля. При повышении напряжения, приложенного к диоду, первыми начинает эмитировать небольшое число наиболее эффективных острий, через которые протекает большой ток еще до того, как начнет эмитировать основная их масса. Поэтому они сгорают из-за недостаточной проводимости и теплопроводности, поскольку охлаждение сильно вытянутого острия происходит с небольшой площади основания. Дополнительным механизмом разрушения острий является их распыление под влиянием ионной бомбардировки остаточной атмосферы прибора.

Одним из наиболее привлекательных материалов для полевых источников электронов ВИС является кристаллический кремний. В первую очередь это обусловлено развитой технологической базой кремниевой микроэлектроники, обеспечивающей создание на кристаллах кремния высокоаспектных острий с высокой поверхностной плотностью, а также неограниченными возможностями использования для создания приборов и устройств наноэлектроники и нанофотоники [13-16]. В частности, обнаружение люминисцентных свойств нанокристаллического кремния позволяет надеяться на создание в будущем сверхбыстродействующих радиационно стойких кремниевых интегральных схем с оптической связью [15]. Большой интерес вызывают исследования, направленные на создание фотопольевых детекторов со сверхвысокой квантовой эффективностью, которые могут работать в инфракрасной области спектра, а также вакуумных транзисторов и светодиодов, которые по теоретическим оценкам могут работать на терагерцовых частотах. В работе [12], например, с помощью фотолитографии в кремнии создавали миниатюрные полости, на дне

которых располагались эмиттер и коллектор. Расстояние между ними составляло 150 нм. Устройство работает в точности как классическая электронная лампа. Напряжение между катодом и анодом, после которого начиналась эмиссия электронов, составляло около 10 В. По данным авторов работы, миниатюрная лампа могла работать при частотах в 0,46 тГц, что на порядок больше, чем максимальная частота лучших кремниевых транзисторов. Характерно, что для ее работы не потребовалось создавать в полости вакуум - лампа была настолько мала, что это делало крайне низкой вероятность встречи электрона с молекулой газа на пути между катодом и анодом.

В [17] представлен относительно простой метод изготовления матриц высокоаспектных полевых эмиттеров на кремниевых подложках. Устройства получают с помощью технологии HI-PS - комбинации имплантации ионов водорода и пористого кремния, используемого в качестве жертвенного слоя. Получены массивы полевых эмиттеров с остриями диаметром около 0,1 мкм и высотой около 45 мкм без дополнительного улучшения их аспектного соотношения. Предлагается и реализуется технологическая последовательность для изготовления самовыравнивающихся интегрированных автоэмиссионных устройств на основе этой технологии. Электрические характеристики полученных микронаконечников хорошо согласуются с теорией Фаулера-Нордгейма.

На Рисунке 1.1 представлен общий вид и разрез по линии П-П автоэмиссионного триодного устройства, в котором расстояние между электродами меньше, чем у известных автоэмиссионных электронных устройств [18]. Это приводит к снижению запирающего напряжения и анодного напряжения.

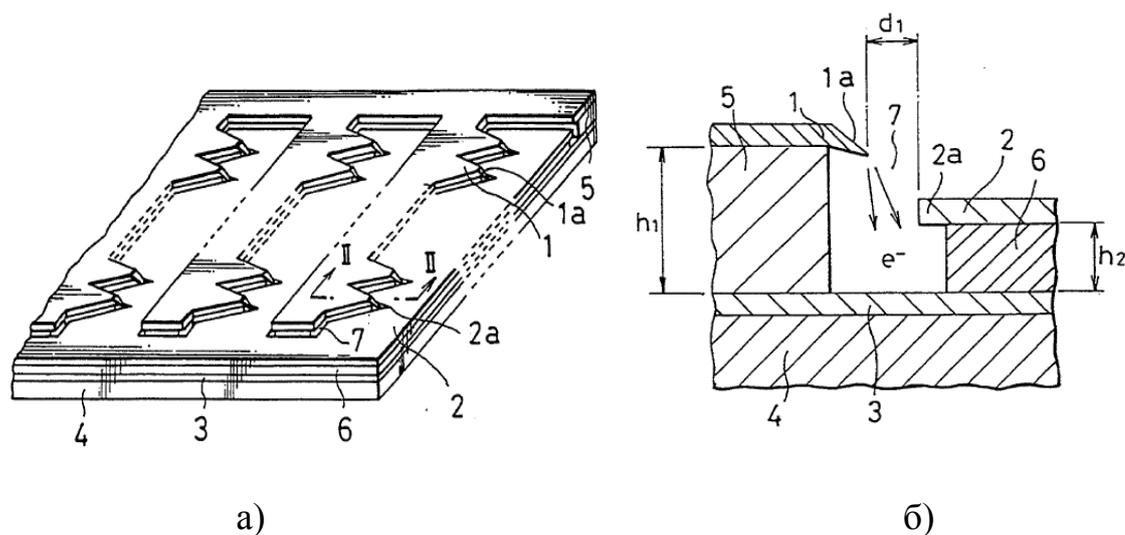


Рисунок. 1.1. Общий вид (а) и разрез по линии II-II (б) автоэмиссионного триодного устройства [18]

В автоэмиссионном устройстве в качестве подложки 4 используется высокоомный монокристаллический кремний. На кремниевой подложке из молибдена сформирован анодный электродный слой 3, на котором расположен изолирующий слой 5 с лежащим на нем катодным электродным слоем 1. Управляющий электродный слой 2 расположен на изолирующем слое 6, который лежит на анодном слое. Катодный электрод расположен напротив управляющего электрода, и они разделены выемкой 7. Изолирующие слои 5 и 6 изготовлены из диоксида кремния. Катодный и управляющий электродные слои изготовлены из молибдена. Горизонтальное расстояние d_1 между катодным и управляющим электродными слоями составляет от 0,1 до 0,5 мкм. Толщина h_1 изолирующего слоя 5 составляет от 0,2 до 1 мкм, изолирующего слоя 6 – от 0,1 до 0,5 мкм. Таким образом, соблюдено соотношение $h_1 > h_2$ и управляющий электрод расположен между анодным и катодным электродными слоями.

Как показано на Рисунке 1.1, слои, лежащие напротив друг друга и разделенные выемкой 7, имеют пилообразную форму. Острие $1a$ катодного электрода имеет остроконечную форму и наклонено по направлению к управляющему электроду 2, при этом оно выступает над изолирующим слоем 5.

Аналогично острие 2а управляющего электрода 2, выступает над изолирующим слоем 6, по направлению к выемке 7.

В автоэмиссионном устройстве построенному по подобному принципу при напряжениях от 20 до 100 В, приложенных между катодным и управляющим электродами, возникают электрические поля порядка 10^7 В/см. Возникающий автоэмиссионный ток из острия катодного электрода изменяется при изменении напряжения на управляющем электроде.

Недостатками полевых источников электронов на основе кремния являются высокая чувствительность к состоянию поверхности и низкие плотности автоэмиссионных токов, которые, как правило, находятся в интервале 50...150 мкА/см². Так, в работе [19] сотрудников Массачусетского технологического института для плотного массива эмиттеров в виде высокоаспектных пиков из кремния n-типа, созданных с помощью микротехнологии, получены значения максимальной плотности автоэмиссионного тока $J = 145$ мкА/см² при напряженности поля анода $E = 32$ В/мкм. Такие плотности токов удовлетворяют требованиям использования чисто кремниевых автоэмиссионных катодов в области FED (field emission displays – дисплеев с полевыми эмиттерами) [20]. Однако этого недостаточно для создания, например, вакуумных полевых транзисторов с высокой выходной мощностью.

1.2 Получение углеродных материалов для высокоэмиссионных пленочных покрытий полевых источников электронов

На пути создания сильноточных АЭК имеется ряд принципиальных трудностей. Они обусловлены проблемами повышения, с одной стороны, прозрачности потенциальных барьеров на границе твердое тело - вакуум, а, с другой, электрической прочности материалов АЭК, так как полевая эмиссия осуществляется при напряженностях внешнего электрического поля $\sim 10^6$ - 10^7 В/см, что весьма близко к прочности большинства известных материалов.

Верхним пределом изменения напряженности поля является электрический пробой и разрушение материала катода с возникновением вакуумного электрического разряда, которые зависят от электрофизических свойств и конструкции диодных систем, степени вакуума в приборе и других факторов.

Анализ исследований в области полевой СВЧ электроники показывает, что наиболее перспективными для применения в качестве автоэмиссионных источников электронов являются нанокуглеродные материалы с различными типами химических связей [3, 21-24]. Их перспективность, кроме высокой радиационной стойкости при эксплуатации в техническом вакууме, обусловлена возможностями снижения работы выхода электронов при структурных модификациях, характерных, как для алмазного типа гибридизации связей валентных электронов, так и для «открытых» углеродных нанотрубок (УНТ) (Рисунок 1.2).

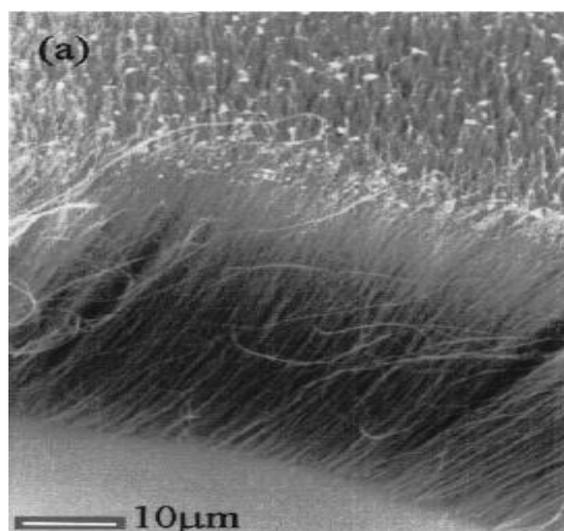


Рисунок 1.2. Углеродные нанотрубки, полученные CVD методом

Сообщалось, что плотность тока полевой эмиссии отдельной УНТ диаметром 14 нм составляла $\sim 10^3$ А/см², а пороговая напряженность поля начала автоэмиссии УНТ с различными диаметрами составляет от 0,1 до 2 В/мкм [25, 26]. При автоэлектронной эмиссии из углеродных нанотрубок в импульсном режиме с длительностью импульса 50 мс и циклом 1:50 максимальный эмиссионный ток

достигал 2 А, а плотность тока составляла 8 А/см² [27]. В публикации [28] сообщается, что УНТ пленки со средней плотностью эмиттеров 10⁷ эмиттеров/см², способны обеспечить локальную плотность тока порядка 100 А/см².

Большое распространение получили конструкции полевых катодов, в которых содержится множество пучков вертикально ориентированных УНТ. Все пучки нанотрубок электрически соединены, и пространственно разделены диэлектрическим материалом, на поверхности которого находится проводящий слой, выполняющий роль вытягивающего электрода. Один такой катод может содержать до миллиона пучков нанотрубок [29-32]. Для предотвращения электрических утечек между вытягивающим электродом и катодом на стенки отверстий матрицы наносится изолирующий слой (Рисунок 1.3) [33].

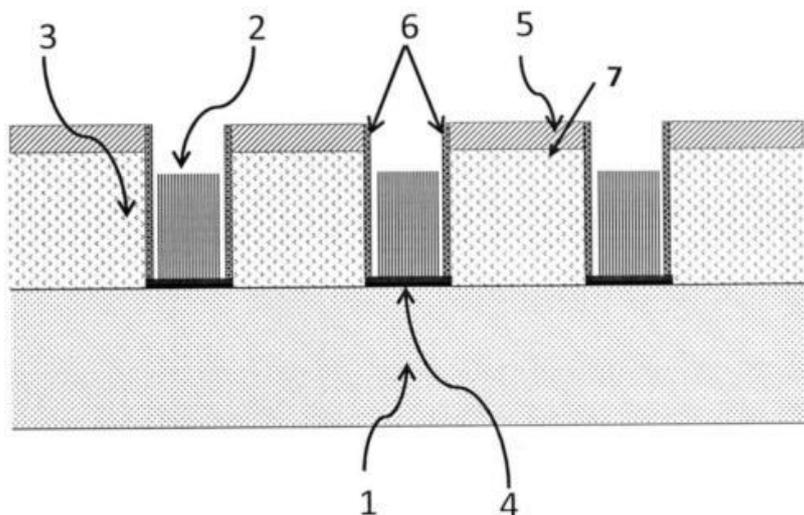


Рисунок 1.3. Конструкция многопучкового полевого катода на основе УНТ [33]: 1- электропроводящая подложка, 2 – массив УНТ, 3 - диэлектрический слой, 4- слой катализатора для выращивания УНТ, 5 - вытягивающий слой, 6 - изолирующий слой, 7 - матрица сквозных отверстий

Однако, попытки создания многопучковых катодов на основе УНТ не дали ожидаемых эмиссионных характеристик. Основной причиной этого, как показали

наблюдения, является низкая адгезионная прочность между УНТ матрицей и подложкой [34], а также подверженность к перенапылению на анод.

Анализируя исследования в области создания сильноточных АЭК можно увидеть, что по сравнению с металлическими катодами применение углеродных нанокompозитных материалов с варьирующимися типами химических связей, являются максимально подходящими и перспективными для создания источников автоэмиссионных электронов [21-24].

Атомы углерода способны образовывать большое число всевозможных структурных образований – так называемых аллотропных модификаций (Рисунок 1.4). Большое разнообразие соединений атомов углерода определяет широкий спектр уникальных свойств. Известны применения для самых различных, и, на первый взгляд, противоположных свойств углерода: его мягкость и твёрдость, абразивность и смазочные свойства, диэлектрические свойства и электропроводность, прозрачность и др. Имеется широкий спектр отраслей промышленности, где используются разнообразные свойства алмаза. Так, например, из-за своей прозрачности алмаз используется в ювелирных изделиях, его твёрдость нашла применение в различных режущих инструментах, а теплопроводность используется при проектировании систем рассеивания тепла от узлов, для которых тепловая энергия может приводить к значительным сбоям в работе. Для применения в микро и нанoeлектронике исследуется эмиссионная способность углеродных нанотрубок, алмазоподобных плёночных покрытий, острийных и прочих структур, созданных из углерода [см., например, 35]. Исследования, проводимые в рамках данной работы, направлены на изучение полевых эмиссионных, а также антиэмиссионных свойств углерода.

Метод осаждения высококачественных алмазных плёнок из паровой фазы, активированной газовым разрядом оказался весьма продуктивным, что привлекло значительное внимание исследователей [36-38]. В этой связи главной задачей являлось создание технологий управляемого синтеза алмазных и алмазоподобных плёнок. Основными технологиями получения тонких плёнок из реакционной

газовой среды, разложенной в ходе теплового и плазменного воздействия, являются разновидности CVD метода, такие как высокочастотная (HFCVD) и микроволновая (MPCVD) виды плазм.

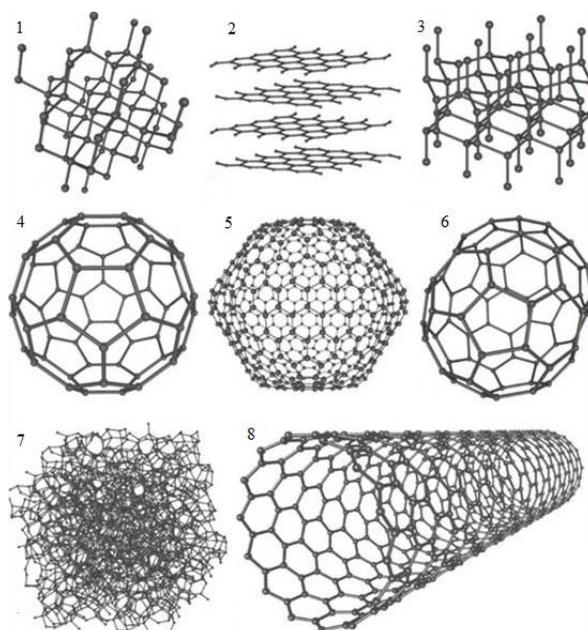


Рисунок 1.4. Примеры известных структурных образований из углерода: 1- алмаз; 2- графит; 3- лонсдейлит; 4,5,6 – фуллерены; 7- аморфный углерод; 8 - тубулен

Как известно, главным недостатком высокочастотного CVD метода является загрязнение осаждаемых пленок атомами металла, поступающими с металлических электродов, что не позволяет осаждать высококачественные алмазные пленки. В то же время, пленки, получаемые с помощью микроволновой плазмы, имеют широкий диапазон высококачественных структурных форм от поликристаллических до монокристаллических алмазов, что позволяет применять их во многих областях науки, техники и медицины, а также в промышленном производстве [39-41]. Что касается различий в технологиях получения различных модификаций алмаза, то было установлено, например, что плазменная среда, обогащенная водородом, позволяет синтезировать микрокристаллический алмаз, а при добавлении к водороду аргона формируется нанокристаллический алмаз [42-

45]. В работах [46-55] был применен безэлектродный MPCVD метод, который позволил создать тонкопленочные композиционные наноалмазографитовые структуры. В работе [55] композиционная алмазографитовая структура была получена при разложении в микроволновой плазме смеси метана с водородом, аргон и азот при этом не добавлялись. А в работе [49] была получена эффективная автоэлектронная эмиссия из нанокристаллического алмаза, который, как известно, обладает отрицательным сродством к электрону. Варьирование, в широких пределах, состава наноалмазографитовых композитов позволяет получать пороги начала эмиссии в пределах от 2,91 до 11,6 В/мкм [50-53]. В связи с вышесказанным необходимо отметить серьезный потенциал применения наноалмазографитовых структур в эмиссионной электронной технике.

Несмотря на все вышеперечисленные достоинства наноалмазных структур, возникает фундаментальный вопрос об устойчивости наноразмерных алмазных кристаллитов. Это связано с двумя факторами, основанными на величине поверхностной энергии, которая является для алмаза достаточно большой. Во-первых, большая поверхностная энергия снижает устойчивость кристаллитов с размерами до 10 нм, которые стремятся уменьшить свободную энергию агрегируясь в более крупные образования. Во-вторых, это создает возможности для межфазного алмазографитового перехода, поскольку поверхностная энергия, приведенная на моль атомов в объеме, достигает величины сотен кДж/моль. При такой энергии возможно изменение фазового состояния углерода.

Эксперименты по смачиванию и скалыванию кристаллов алмаза, а также проведенные расчеты позволяют определить его поверхностную энергию. В частности, анализ поверхностной энергии нанокристаллитов алмаза с различным габитусом и поверхностью, подвергнутой окислению и гидрированию, был представлен в работе [56], где на основании термодинамических и термодинамических методов были проведены расчеты, которые показали, что поверхностная энергия может иметь отрицательное значение. В то же время, значимые изменения поверхностной энергии алмаза, по сравнению с графитом, не

были установлены в экспериментах по смачиванию в инертной атмосфере и атмосфере водорода.

Исходя из вышесказанного, синтез углеродных материалов с различными аллотропными модификациями, включая наноалмазные кристаллические включения с различной дисперсностью в графитовой матрице, возможен только при знании фундаментальных факторов, которые позволят реализовать кинетические преимущества и низкотемпературные условия получения. Также определение этих факторов позволит понять их влияние на механизмы полевой и вторичной электронной эмиссии. Так для получения плотности тока 100 А/см^2 и выше концентрация на поверхности катода наноалмазных эмиттеров, демонстрирующих высокую стабильность и деградационную стойкость, согласно простых расчетов, должна составлять порядка $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$. При этом токовая нагрузка с каждого из них может составить от 1 до 100 мкА, что согласно приведенным выше литературным данным является достижимым при использовании острых алмазных эмиттеров и во много раз превышает существующие ныне потребности.

1.3 Модели механизмов автоэлектронной эмиссии

Классической и общепринятой моделью механизма автоэлектронной эмиссии, достаточно хорошо описывающей эмиссию электронов из металлов, является закон Фаулера – Нордгейма, согласно которому для наиболее эффективного процесса полевой эмиссии катод должен иметь значительный коэффициент усиления поля или достаточно низкую работу выхода [57]. В данной модели используется одномерное приближение, при котором граница эмиттера является плоскостью, а электрическое поле однородно.

Автоэлектронная эмиссия из металлов в вакуум изучена наиболее полно. В этом случае плотность тока j , согласно закону Фаулера – Нордгейма, может быть представлена в виде:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi t^2(y)} \exp \left[-6,85 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{E} v(y) \right], \quad (1.1)$$

где $y = 3,79 \cdot 10^{-4} (\sqrt{E}) / \varphi$. Функции $v(y)$ и $t(y)$ табулированы [9]. Функция $t^2(y)$ в предэкспоненциальном множителе близка к единице и слабо изменяется с изменением аргумента. Функция $v(y) \approx 0,95 - 1,03y^2$ называется функцией Нордгейма и учитывает понижение потенциального барьера (j , E и φ в А/см², В/см и эВ).

Формула (1.1) получена в следующих предположениях: свободные электроны в металле подчиняются статистике Ферми – Дирака; вне металла на электрон действуют только силы зеркального изображения. Прозрачность барьера D (ε , E) рассчитывалась в квазиклассическом приближении. Квантово-механические расчеты показывают, что выражение для прозрачности произвольного барьера может быть записано в виде [58]:

$$D \approx \exp \left[-\frac{2}{h} \int_0^l \sqrt{2m(U-W)} dx \right], \quad (1.2)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, m - масса туннелирующей частицы, U - потенциальная энергия, W - энергия частицы, падающей на барьер.

Согласно уравнению (1.2) частица может пройти сквозь потенциальный барьер с вероятностью, которая зависит от его ширины и высоты, определяемой работой выхода.

Как уже было замечено выше, закон Фаулера – Нордгейма хорошо согласуется с экспериментами по автоэлектронной эмиссии электронов из металлических катодов, при которой может достигаться большая плотность тока (j), экспоненциально зависящая от напряженности приложенного поля (E) и работы выхода (φ). Стоит отметить, что экспоненциальный характер тока приводит к более узкому разбросу электронов по энергиям, в разы уже, чем при термоэлектронной эмиссии. При плотности тока 10^6 - 10^7 А/см² имеет место его уменьшение по сравнению с величиной, рассчитанной по (1.1), что связано с влиянием объемного заряда или с особенностями формы потенциального барьера.

Дальнейшее увеличение напряжения ведет к росту плотности тока до величины 10^8 - 10^{10} А/см², при которой происходит вакуумный пробой с протеканием взрывной эмиссии, что заканчивается разрушением эмиттера [59].

В случае эмиттеров из других материалов, в том числе, обладающих полупроводниковыми свойствами, и/или имеющих форму границы отличную от плоскости, наблюдается отклонение эмиссионных характеристик от закона Фаулера – Нордгейма. К сожалению, далеко не всегда закон Фаулера – Нордгейма может корректно описать автоэлектронную эмиссию из сложных по фазовому составу материалов, будь то наноструктурированные полупроводники или углеродные наноконпозиты. Причиной тому может быть размерное квантование, особенности проникновения поля в композитный материал катода, а также возможности туннелирования электронов через потенциальный барьер [3, 60-62]. Поэтому, не вызывает сомнений необходимость учета упомянутых факторов при анализе процессов автоэмиссии из неметаллических катодных структур. В связи с этим для лучшего понимания взаимосвязей между базовыми характеристиками автоэлектронной эмиссии, и для их последующего объяснения целесообразно приложить не применявшиеся ранее для этой сферы знаний физические эффекты. К подобного рода эффектам следует отнести поляризацию поверхностных атомов в сильных импульсных электрических поля, изменения величины заполнения энергетических состояний, квантово-размерные эффекты и др. Для автоэлектронной эмиссии рассмотрение подобного рода эффектов носит не только фундаментальный характер, но и значительный прикладной интерес, связанный с возможностями применения автоэмиссионных материалов в устройствах вакуумной микроэлектроники субтерагерцового диапазона частот.

К настоящему моменту разработан целый ряд моделей, на основании которых дается объяснение механизмов низковольтной полевой эмиссии из неметаллических плоских и острых катодов. Все известные модели не лишены недостатков, но в комплексе дают вполне удовлетворительное объяснение происходящим в эмиттерах процессам. Одной из наиболее известных моделей

является модель локального усиления поля геометрическими неоднородностями с высоким аспектным отношением, расположенными на эмитирующей поверхности [62]. Наличие на поверхности неоднородностей, в качестве которых могут выступать нанотрубки, нановолокна или наноострия, могут значительно усиливать приложенное электрическое поле, что приводит к уменьшению ширины потенциального барьера и возникновению автоэмиссионного тока.

Эта модель хорошо описывается законом Фаулера – Нордгейма, в котором усредненное значение напряженности электрического поля между катодом и анодом (E) необходимо заменить «концентрационным» значением $\beta \cdot E$, где β можно назвать коэффициентом усиления поля, которое оценочно равно отношению высоты неоднородности (l) к радиусу кривизны ее острия (r). Для структур с высокоаспектными поверхностными неоднородностями вид автоэмиссионных характеристик, построенных в координатах Фаулера-Нордгейма, имеет, в целом, линейный вид, что говорит о классическом механизме полевой эмиссии, но при этом имеется несоответствие β между величиной, полученной из расчета на основании геометрических параметров неоднородности и из автоэмиссионных зависимостей.

Разновидностью представленной модели является усиление электрического поля проводящими каналами внутри углеродного материала, состоящего из проводящей (sp^2) и диэлектрической (sp^3) фаз. В таких структурах внешнее электрическое поле, проникая в объем углеродной пленки, усиливается в результате поляризации цепочки доменов, границ зерен и других протяженных образований, состоящих из углерода sp^2 фазе [63, 64]. Попытки оценить β для сферических доменов дали соотношение: $0,5 \cdot h / r$, где h – расстояние от границы домена до других доменов или подложки, r – радиус домена [65].

Общим недостатком этих двух моделей является то, что для получаемых работ выхода порядка долей электронвольта, величина β должна составлять сотни или даже тысячи, что не соответствует геометрическим размерам наблюдаемых

структур и самих пленок. Поэтому авторами многих статей делается вывод о наличии дополнительных механизмов, обеспечивающих автоэлектронную эмиссию [66].

Согласно модели Фаулера – Нордгейма эффективная эмиссия электронов обеспечивается при условии значительного усиления поля или пониженной работе выхода. Понижение работы выхода рассматривается в рамках применения для автоэмиссионных целей алмазоподобных пленок. В силу того, что алмаз обладает низким сродством к электрону [67], благодаря чему имеет место высокая прозрачность поверхностного барьера для электронов зоны проводимости. Для повышения прозрачности барьера проводят легирования алмаза донорными примесями [68] либо увеличивают дефектность кристаллической структуры алмаза [69]. Эти процедуры приводят к смещению уровня Ферми к дну зоны проводимости, увеличению ее заселенности и облегчению транспорта электронов к поверхности. Все это должно приводить к повышению эффективности автоэлектронной эмиссии.

Одним из механизмов, обеспечивающих низковольтную эмиссию является механизм, в основе которого лежат квантоворазмерные эффекты, имеющие место в наноструктурированных углеродных материалах, и проявляющиеся в локализации электронов в наноразмерных областях. В зависимости от степени ограничения в движении электрона рассматриваются квантовые ямы или квантовые точки. В моделях, основанных на размерных эффектах ключевая роль отводится свойству наноразмерных структур, связанному с уменьшенной работой выхода и высоты потенциального поверхностного барьера [66, 70]. Частным случаем эмиссии электронов из графитоподобных доменов можно рассматривать механизм переноса через поверхностные состояния. Такой механизм рассматривается для поверхностных состояний алмазных кристаллитов [66].

Следствием проявления размерных эффектов, как считают некоторые авторы, является не только снижение работы выхода, но и изменение электронных свойств графитоподобных доменов, выраженное в появлении

запрещенной зоны в спектре энергий электронов, что может быть связано с увеличением числа поверхностных состояний, выполняющих роль ловушек. При этом объемная проводимость структуры падает, но растет проводимость по поверхности доменов [71, 72]. Эта модель дополняется моделью резонансного туннелирования [73]. В ней предполагается, что эмитирующие электронные состояния поверхностных структур с дискретными энергетическими уровнями в отсутствие поля являются незаполненными. При приложении достаточно сильного поля энергия этих состояний снижается из-за проникновения поля в эмиттер. С уменьшением этой энергии до энергии заполненных состояний в объеме становится возможным процесс туннелирования через два барьера [74]: подложка-зона проводимости пленки и пленка-вакуум.

В термоэлектрической модели эмиссии [75] рассматривается выделение тепла при протекании тока через эмиссионные центры, представляющие собой графитовые sp^2 -области в окружении непроводящей sp^3 -матрицы. Поток тепла в проводящих образованиях приводит к появлению термо-ЭДС, возникающей из-за увлечения электронов фононами, что приводит к увеличению энергии электронов и снижению высоты потенциального барьера. В результате чего облегчается процесс эмиссии электронов.

Все известные модели рассматривают процессы, связанные с началом эмиссии из нанокуглеродных структур. При этом повышение напряженности электрического поля до возникновения неуправляемого процесса взрывной эмиссии, когда значения токов на порядки превышают ожидаемые значения, как правило, не изучаются. Модель, описывающая взрывную эмиссию электронов с поверхности металлических катодов, представлена в работах Г.А. Месяца [59, 76]. Механизм импульсного пробоя вакуумного промежутка для металлических катодов состоит из следующих стадий: возникновение автоэлектронной эмиссии, взрыв микроострия на катоде с образованием плазмы катодного факела, искровая стадия пробоя, переход в дуговой разряд. Надо полагать, что для углеродных

катодов общий порядок процессов, протекающих при критических напряженностях поля, во многом будет аналогичным.

1.4 Механизмы возникновения вторичной эмиссии электронов и способы совершенствования КСУ электронных пушек СВЧ ЭВП

В электровакуумных СВЧ-приборах с низковольтным управлением для формирования электронного пучка используют катодно-сеточные узлы, которые включают в себя металлопористый катод с порами, заполненными примесными добавками, которые уменьшают температурный коэффициент работы выхода электронов, и, управляющей интенсивностью электронного потока, сетки.

У идеального катода такая особенность должна отсутствовать, при этом катод должен обладать минимальной величиной работы выхода и эмитировать электроны в течение неограниченного времени. Реально существующие образцы эмиттеров в зависимости от особенностей их конструкции и условий эксплуатации в той или иной степени обладают свойством испарения продуктов, находящихся в их составе. Механизм испарения веществ МПК тесно связан с его конструктивными особенностями. Тело МПК должно обладать некоторым процентом открытой пористости на эмитирующей поверхности. Пористость обеспечивает возможность образования на поверхности МПК соединений молекул бария, поступающих из его объема, что приводит к понижению работы выхода электронов и получению рабочего тока. Ограниченность времени жизни бария на поверхности катода, а также возможный, например, локальный избыточный его поток из объема на поверхность, приводят к испарению металлического или в соединении с кислородом молекул бария. Таким образом, испарение примесных добавок (главным образом Ва и ВаО) является особенностью эксплуатации МПК с токоотбором.

Остаточный запас активного вещества в теле катода – основной критерий его работоспособности, а также изделия в целом. При этом, несмотря на

остаточный потенциальный запас работы катода, продукты, испарённые с его поверхности, могут приводить к появлению устранимых или катастрофических отказов изделия.

Одним из наиболее распространённых последствий эксплуатации МПК является напыление примесных добавок на ближайшие электроды. В особенности это касается пушечных узлов с сеточным управлением. Это обусловлено расположением сетки, которая находится над поверхностью катода на расстоянии десятков или единиц микрометров. Близкое расположение управляющей сетки обусловлено необходимостью получения ВАХ с высокой крутизной. Это приводит к нескольким последствиям: к повышенному оседанию продуктов испарения с катода, высоким температурам разогрева сетки, как посредством радиации с катода и теплопередачи по деталям арматуры узла, так за счёт токоперехвата сеткой части электронного потока с катода, а также высоким отрицательным потенциалам, которые прикладываются к сетке относительно катода для запирающего последнего. Все перечисленные эффекты в зависимости от конструкции пушечного узла и условий его эксплуатации, по отдельности или в некоторой своей совокупности приводят к появлению паразитной термоэмиссии с управляющей сетки.

Частично эти недостатки удаётся устранить путём введения в промежуток между катодом и управляющей сеткой теневой сетки, находящейся под потенциалом катода. В такой конструкции теневая сетка изготавливается в строгом соответствии геометрическим размерам управляющей сетки. По этой причине, а также по причине расположения поверхностей теневой сетки строго напротив поверхности управляющей сетки, удаётся добиться электрической экранировки той части катода, которая расположена непосредственно под сетками. Таким образом, удаётся значительно снизить токоперехват управляющей сеткой, что может выражаться в значительном понижении её рабочей температуры.

Однако, использование теневой сетки снижает эффективную эмитирующую площадь МПК, что требует повышения плотности токоотбора с его поверхности. Необходимость получения высоких (\sim десятков A/cm^2) плотностей токов приводит к необходимости повышения рабочей температуры катода. Примерная зависимость скорости испарения продуктов работы от температуры катода показана на Рисунке 1.5 [77].

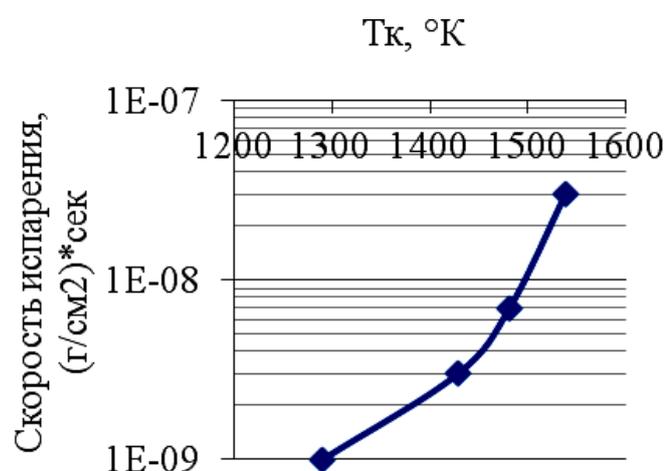


Рисунок 1.5. Зависимость скорости испарения продуктов работы МПК от рабочей температуры

По названным причинам это снижает долговечность катода, как вследствие уменьшения в МПК запаса активного вещества и увеличения скорости его испарения, так и вследствие повышения эксплуатационной температуры сетки и возникновения паразитной эмиссии электронов.

Учитывая эти особенности эксплуатации МПК, для изготовления сеточных структур, как правило, выбираются материалы, способные сохранять устойчиво высокий порог возникновения термоэмиссии в течение времени эксплуатации приборов в условиях близкого расположения от источника нагрева и испарения веществ, способных понижать работу выхода чистого материала. Среди наиболее часто используемых материалов для изготовления управляющих сеток стоит выделить молибден и гафний (Hf). При этом именно Hf обладает наибольшей

устойчивостью к сохранению эмиссионных свойств в процессе работы вблизи МПК. Несмотря на тщательный подбор материалов для изготовления управляющей сетки, появление паразитной термоэмиссии с её поверхности является одной из самых распространённых причин отказа изделия.

К другим негативным последствиям появления электронного потока с сетки можно отнести дополнительный нагрев анода и замедляющей системы в промежутки времени, когда ток должен отсутствовать и должно происходить остывание. В случае появления тока в пространстве взаимодействия с электромагнитной волной может происходить усиление паразитного сигнала, который попадает на вход замедляющей системы, в результате чего снижается информативность полезного сигнала. Кроме того, в сеточных пушечных узлах с теневой сеткой, работающей под потенциалом катода, можно отнести высокий риск расплавления одной из сеток. Как правило, безвозвратному повреждению подвергается теневая сетка, изготовленная из более тонкого материала. Разрушению одной из сеток предшествует процесс обмена энергиями между сетками в моменты времени, когда напряженность электрического поля изменяет направление. При этом, в зависимости от направления поля, происходит процесс термоэмиссии с одной сетки, энергия эмитированных электронов передаётся другой, при смене полярности происходит обратный обмен энергии между сетками и т.д. [78]. Процесс развивается, пока возрастающие температуры сеток не приведут к деформации и разрушению одной из них.

Таким образом, проблема, связанная с выходом из строя ЭВП, в результате развития термоэмиссии (ТЭ) на неэмитирующем элементе (сетке) КСУ, является актуальной. Перспективной является разработка технологии производства сеточных структур, обеспечивающей более длительную работу изделия без развития ТЭ сеток до критических значений, в том числе, с усовершенствованием существующей технологии, в которой используется Hf. Также перспективным является поиск материалов, предназначенных для альтернативной замены Hf. При этом эксплуатационные характеристики приборов с новыми материалами должны

быть аналогичны или иметь преимущества перед приборами, в которых установлены сетки из Hf.

Известны два основных механизма подавления эмиссии с сеток [10, 11]. Один из них связан с растворением в толще антиэмиссионного покрытия сеток продуктов испарения МПК путем образования интерметаллидных соединений. Механизм реализуется, когда в качестве покрытия применяют золото и платину. Другим механизмом является уменьшение энергии связи продуктов испарения МПК с поверхностью антиэмиссионного вещества сетки. В этом случае замедляется скорость осаждения активного вещества. Механизм реализуется при применении в качестве покрытия сеток молибдена, титана, циркония.

Одним из наиболее перспективных материалов антиэмиссионных покрытий КСУ, благодаря высокой устойчивости к радиационным воздействиям и работы выхода электронов, являются углеродные пленочные структуры [79-82]. В настоящее время получение антиэмиссионных покрытий с низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) на поверхности металлических и изоляционных материалов достигается, в основном, за счет создания развитого рельефа на поверхности углеродной пленки. Для этого используют, например, наноуглеродные покрытия со свободно стоящими листами графена, полученные с использованием микроволновой плазмы и легированных азотом [11], или графитовые пленки с углеродными волокнами, которые вертикально и равномерно распределены по поверхности [79]. При бомбардировке таких покрытий первичным пучком электронов вторичные электроны излучаются под разными углами от поверхности графитовой стенки. Так как очень немногие из них возвращаются в вакуум после многократного излучения и поглощения углеродными волокнами коэффициент излучения вторичных электронов меньше 1. Недостатком таких покрытий является высокая адсорбционная способность испаренных с катода атомов активных примесей МПК вследствие быстрой их термализации за счет многократных столкновений со стенками листов графенов или углеродных волокон. Это увеличивает

коэффициент прилипания испаренных атомов, что приводит к постепенному «зарастанию» микрорельефа и ухудшению КВЭЭ в процессе эксплуатации мощных генераторных ламп.

1.5 Выводы к главе 1 и постановка задачи

1. Согласно современным представлениям, при поиске соответствующих условий синтеза и кинетических преимуществ допускается возможность получения нанокompозитных углеродных материалов, содержащих аллотропные модификации атомов углерода в sp^2 и sp^3 валентном состоянии гибридизации с алмазными кристаллитами различной дисперсности.

2. Оценки показывают, что для получения высокостабильных и деградационно стойких эмиттеров с плотностью до 100 А/см^2 и выше необходимо иметь поверхностную плотность алмазных нанокристаллитов не менее, чем $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$. По имеющимся литературным данным, эмиссия тока с каждого алмазного нанокристаллита, имеющего форму острия, может составлять 1-100 мкА, что гораздо выше текущих требований по величине тока.

3. Разработанные в настоящее время модели автоэлектронной эмиссии, несмотря на свое многообразие, достаточно хорошо описывают только отдельные стороны процессов, происходящих в полевых катодах. Для интерпретации закономерностей сильноточной полевой эмиссии необходимо рассматривать эти модели в совокупности, а при использовании автокатодов в предельных режимах эксплуатации необходимо учитывать также факторы, которые способствуют переходу сильноточной полевой эмиссии во взрывную эмиссию электронов.

4. Практически отсутствуют публикации по исследованию критичности параметров сильноточных полевых источников электронов к изменениям температурно-вакуумных и экстремально сильных электрополевых условий эксплуатации, а также воспроизводимости, долговечности и управляемости

эмиссионных характеристик, изучению фундаментальных электрофизических факторов, определяющих/влияющих на эти характеристики катодов и др.

5. Основными факторами, определяющими допустимую мощность и долговечность ЭВП средней и высокой мощности, являются запас активного вещества в МПК и эмиссия вторичных электронов с сеток КСУ под действием их первичного потока. В процессе эксплуатации ЭВП эмиссия увеличивается из-за термического напыления на сетку активных примесей МПК и повышения ее температуры в результате радиационного нагрева и токоперехвата. Это искажает рабочие характеристики ЭВП, приводит к деградации КСУ и устройства в целом.

6. Проблема, связанная с выходом из строя мощных ЭВП в результате развития термоэмиссионных процессов на управляющей сетке КСУ является весьма актуальной. Для ее решения перспективным представляется разработка технологии получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий с повышенной работой выхода вторичных электронов и низкой скоростью термического осаждения на них активных примесных добавок.

Тема диссертационной работы, направленная на получение и исследование функциональных покрытий на основе углеродных пленочных композитов для СВЧ и субтерагерцовой вакуумно-плазменной электроники, является актуальной и своевременной. Ее цель – совершенствование технологии производства и характеристик полевых источников электронов и катодно-сеточных узлов ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать технологические методики создания сильноточных полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям, включая получение атоэмиссионных 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 алмазографитовых пленочных структур;

3. Исследовать долговременную воспроизводимость автоэмиссионных характеристик тонкопленочных алмазографитовых покрытий с плотностью автоэмиссионного тока не менее 100 А/см^2 , в условиях нестационарных температурно-вакуумных режимов 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 ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов.

Глава 2 Получение наноалмазографитовых структур и исследование воздействия их электрофизических параметров на автоэлектронную эмиссию

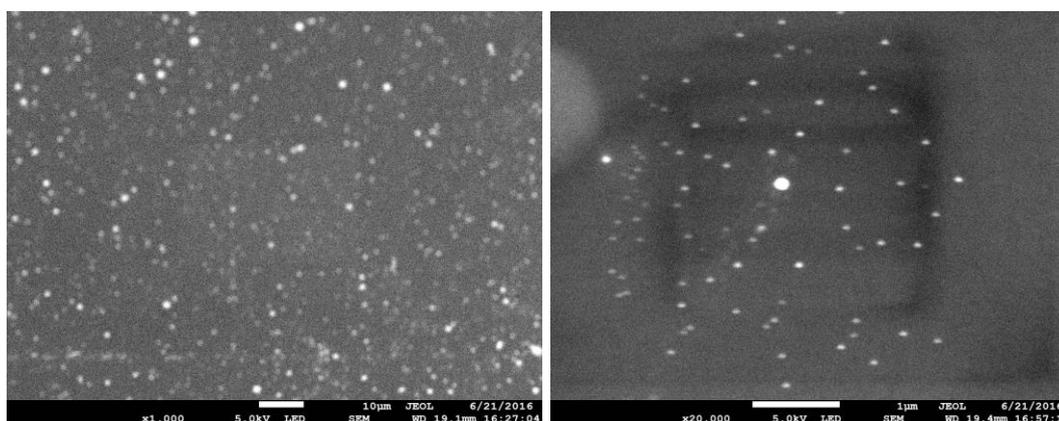
2.1 Синтез и электрофизические свойства наноалмазографитовых тонкопленочных композитов

Осаждение тонкопленочных композитных углеродных покрытий осуществлялось в СВЧ вакуумно-плазменной установке, работающей на частоте 2,45 ГГц [84]. Для достижения условий электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), обеспечивающего максимальную степень ионизации плазмы порядка 5%, величина магнитного поля составляла 875 Гс. Мощность СВЧ излучения была фиксированной для всех типов получаемых покрытий, и находилась на уровне 250 Вт. Плазмообразующим газом, напускаемым в реакционную камеру, являлись пары этанола, которые создавали рабочее давление порядка 0,05-1 Па. Нагрев кварцевых и поликорковых подложек производился до температуры $300 \pm 10^\circ\text{C}$. Морфологические исследования синтезированных структур осуществлялись посредством атомно-силовой (АСМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопий. Структурная характеристика проводилась с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) и комбинационного рассеяния света (КРС).

Проведенные исследования позволили определить оптимальный набор режимов, при которых возможно получение пленочных структур с различной аллотропной модификацией углерода (графен, графит, алмаз), а также наноалмазографитовых композитов с различным соотношением алмазной и графитовой фаз. Замечено, что при температурах осаждения более 200°C и промежуточных давлениях паров этанола между осаждением нанокристаллических алмазных и графитовых пленочных структур, имеет место формирование наноалмазографитового композита, состоящего из проводящей графитовой матрицы с наноразмерными алмазоподобными включениями, имеющими размеры 5-100 нм и концентрацией на поверхности, достигающей 10^6 –

10^8 см^{-2} (Рисунок 2.1). Размер и концентрация нанокристаллитов зависят от режима осаждения. При проведении РСА было установлено, что в синтезированных пленках наблюдаются микрокристаллические графитовые включения (002), наличие алмазоподобной фазы с кубической ориентацией (111), а также гексагональные решетки со структурными модификациями типа лонсдейлит, C(20H) и некоторые другие. Образцы, полученные в СВЧ плазме при положительном потенциале подложкодержателя, и исследованные с помощью сканирующего электронного микроскопа «JEOL», продемонстрировали, в видимом диапазоне, интенсивную катодолюминесценцию. Это явление говорит о том, что в полученных структурах присутствуют атомы углерод как с sp^2 гибридизацией (графит, графен), так и в sp^3 состоянии гибридизации (алмаз). Подтверждением тому служат результаты КРС, приведенные на Рисунке 2.2. Для структур, полученных при давлениях паров этанола 0,05-0,07 Па (кривая 1 на Рисунке 2.2), характерным является наличие ярко выраженного двухпикового спектра: достаточно сильной линии в области 1330 см^{-1} , которая свидетельствует о присутствии алмазной фазы, и второго пика в области 1580 см^{-1} , который обусловлен присутствием углерода в форме графита, как кристаллического, так и аморфизованного. Появление в спектре КРС размытого сигнала в районе частоты 1150 см^{-1} , характерного для поликристаллических алмазных пленок, обычно связывают с уменьшением дальнего порядка в алмазных кристаллитах до величины в несколько нанометров и/или наличия sp^2 гибридизации на их поверхности (кривая 2 на Рисунке 2.2). В области режимов, соответствующих получению преимущественно графитовых пленок (кривая 3 на Рисунке 2.2) доминирующим является сигнал в области 1580 см^{-1} . Что касается полосы 1330 см^{-1} , то ее наличие может свидетельствовать о наличии в графитоподобной матрице некоторого объема алмазной фазы, сформированной благодаря влиянию кинетических факторов.

Установлено, что в пленках, в которых графитовая фаза является преобладающей, (кривая 3 на Рисунке 2.2), напряженность электрического поля начала автоэлектронной эмиссии (порог эмиссии) увеличивается в 2-3 раза по сравнению с наивысшим порогом эмиссии, характерным для пленок, в которых преобладающими являются фазы поли- и нанокристаллического алмаза. Пленки, содержащие только нанокристаллический алмаз (кривая 2 на Рисунке 2.2), не обладали ни электропроводностью, ни эффективной автоэлектронной эмиссией.



а)

б)

Рисунок 2.1. Изображения тонкопленочных наноалмазграфитовых композитов, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа при увеличениях: а) $\times 1000$; б) $\times 20000$

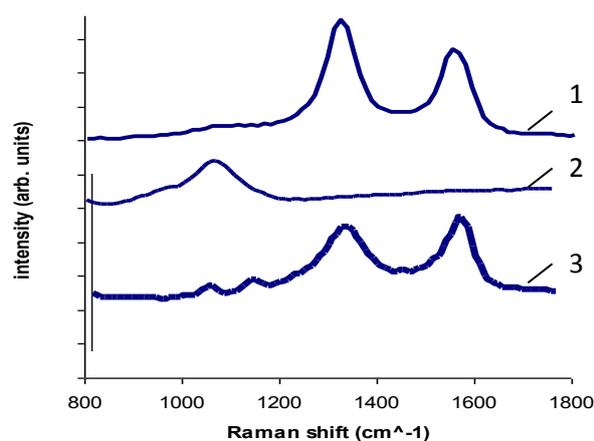


Рисунок 2.2. Спектры КРС для наноалмазграфитовых (1), нанокристаллических алмазных (2) и графитоподобных (3) пленок, полученных в различных режимах микроволнового газового разряда паров этанола

2.2 Механизм формирования композитных алмазографитовых пленочных структур в микроволновой плазме паров этанола

Эффект самоорганизации алмазных нанокристаллитов в графитовых матрицах обусловлен следующим. Благодаря способности СВЧ ЭЦР плазмы при диапазоне давления паров этанола 0,01-0,5 Па, изменяя частоту столкновения заряженных частиц, генерировать свободные электроны с широким спектром энергий, которые в свою очередь, в ходе неупругих соударений с молекулами плазмообразующей среды, создают ионы и атомы углерода с различными уровнями возбуждения. Эти ионы в ходе термических ударов о подложку с низкой температурой, а также в результате локальных пересыщений формируют новую фазу, имеющую различные аллотропные модификации. Что касается образования алмазных наночастиц, то вероятность их появления определяется кинетическими факторами, а не термодинамическими процессами.

Для получения в СВЧ ЭЦР плазме углеродных пленок с повышенным содержанием связанного водорода в виде моно- и дигидридных связей необходимо подавать на подложкодержатель отрицательный потенциал. В этом случае образование термодинамически обусловленной равновесной фазы графита затруднено, а кинетические факторы, способствующие формированию фаз со смешанными sp^2 -, sp^3 -связями, наоборот усиливаются. Для пленок этого типа на спектрах КРС, в районе 1330 см^{-1} , можно констатировать довольно широкую полосу, которая указывает на значительный разброс размеров кластеров с π -связями, характерных для структур графитового типа. Также в районе 1120 см^{-1} и 1180 см^{-1} наблюдаются небольшие полосы с гауссовым характером, что говорит о присутствии наноалмазной фазы углерода. Очевидно, что подача на подложкодержатель положительного потенциала приводит к существенному снижению поступления ионизированного водорода в формируемую пленку. На спектрах комбинационного рассеяния света можно видеть, что по сравнению с полосой 1580 см^{-1} , полоса 1330 см^{-1} имеет большую интенсивность при

уменьшении ширины (кривая 1 на Рисунке 2.2). Сравнивая полосу 1330 см^{-1} для структур, полученных при положительном потенциале, с аналогичной полосой для случая отрицательного смещения, наблюдается ее изменение, связанное с отсутствием полосы 1250 см^{-1} , которая появляется в результате колебаний углерод-углеродных связей, находящихся в узлах разветвления структуры. Подобное изменение КРС полос говорит о наличии более однородных и крупных графитовых образований с π -связями. Также это свидетельствует об уменьшении степени разветвленности структуры и лучшем сосредоточении ее системы сочленения. Такие структурные особенности нанокристаллических композитов способствуют снижению энергии активации проводимости и обеспечивают более благоприятные условия подвода электронов к алмазным нанокристаллитам, которые, благодаря развитой поверхности и высокой плотности поверхностных состояний и объединения их в поверхностные зоны, обуславливают поверхностную проводимость металлического типа. Помимо этого, малые размеры алмазных кристаллитов приводят к проявлению в них квантово-размерных свойств. Возникающее квантовое ограничение увеличивает нулевую энергию электронов и, согласно выражению (1.2), прозрачность потенциального барьера на границе твердое тело-вакуум.

Известна высокая устойчивость нанокристаллитов алмаза, расположенных на наружной части графитовой матрицы, к сильным электрическим полям и нагреванию до высоких температур, а также наличие у них крайне небольшого радиуса кривизны, что повышает их аспектное отношение. Такая особенность геометрии делает алмазные нанокристаллиты эффективными элементами, обеспечивающими геометрическое усиление электрического поля. В силу небольшой разницы между максимальными и минимальными радиусами кривизны наноалмазных кристаллитов, с которых происходит эмиссия, эмитирующая область, как правило, занимает значительную часть поверхности углеродной нанокомпозитной пленки. Благодаря вышеперечисленным качествам эмитирующая компонента имеет существенную деградационную стойкость, и

обладает более низкой работой выхода, чем монокристаллический алмаз или графитовая пленка.

2.3 Закономерности взаимосвязей электропроводности алмазографитовых композитов с автоэмиссионными ВАХ источников электронов на их основе

Исследования проводились с использованием пленочных наноалмазографитовых композитов с различными электрофизическими свойствами, полученных в различных режимах осаждения на поликорковых подложках в микроволновой плазме паров этанола. Для определения удельного поверхностного сопротивления, методом термовакуумного испарения, на углеродную пленку производилось осаждение металлических контактов. По известному расстоянию между контактными площадками и ширине контактов определялось удельное поверхностное сопротивление (ρ), измеряемое в кОм/□. Для исследования автоэлектронной эмиссии к исследуемой диодной структуре прикладывались импульсные электрические поля с микросекундной длительностью. Уровень вакуума в измерительной установке составлял порядка 10^{-6} Па, а расстояние катод-анод устанавливалось с точностью до 1 мкм. Анод изготавливался из мелкозернистого плотного графита марки МПГ-6, диаметр анода составлял 3 мм. При измерениях автоэмиссионных характеристик пороговым значением эмиссии считались значения напряженности электрического поля, при которых достигалось значение тока 5 мкА.

На Рисунке 2.3 приведены зависимости автоэмиссионных характеристик планарных источников электронов на основе углеродных пленочных покрытий от их удельных поверхностных сопротивлений. Видно, что с увеличением сопротивлений пороги начала автоэмиссии монотонно увеличиваются. Учитывая, что для всех наноуглеродных структур токи автоэмиссии при пороговых напряжениях составляли одинаковую величину (5 мкА), можно заключить, что такая зависимость между пороговой напряженностью поля начала автоэмиссии и

поверхностным сопротивлением хорошо описывается законом Ома. Максимальные автоэмиссионные токи и интервалы допустимых изменений напряженностей импульсных анодных полей, представляющих собой разность между максимальной (предпробойной) напряженностью электрического поля, при которой получен максимальный автоэмиссионный ток, и пороговой напряженностью поля ($\Delta E = E_{max} - E_n$) для каждого сопротивления пленки имеют экстремумы в зависимости от электропроводности пленочной структуры. Это означает, что начиная с некоторого сопротивления рост E_{max} замедляется. Наибольший прирост наблюдается в интервале изменений сопротивлений от 200 до 400 кОм/□. При удалении от этого интервала сопротивлений приросты ΔE уменьшаются. При напряженностях электрических полей, превышающих E_{max} , происходит электрический пробой, который приводит к разрушению пленочной структуры.

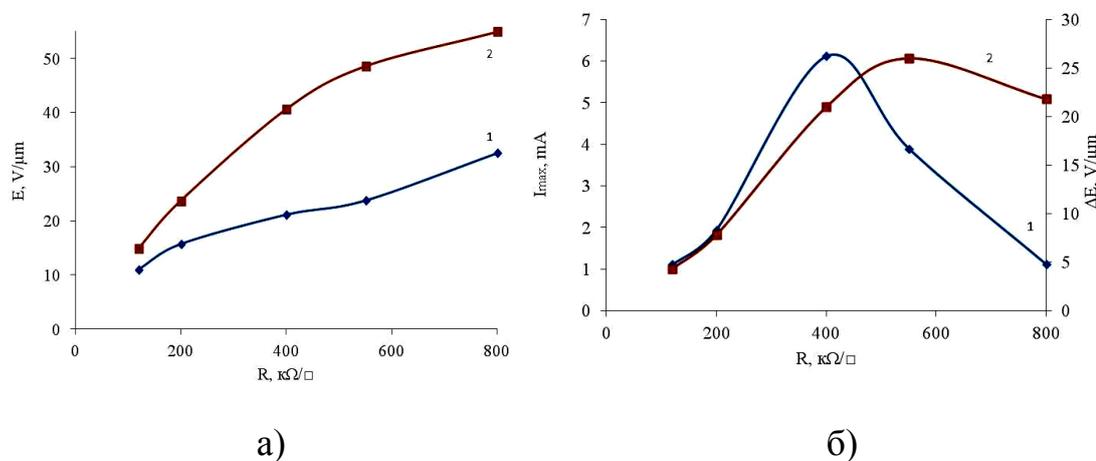


Рисунок 2.3. Зависимости пороговых (1) и максимальных напряженностей электрических полей (2) полевой эмиссии электронов (а), а также максимальных автоэмиссионных токов (1) и интервалов допустимых изменений рабочих напряженностей импульсных анодных полей (2) (б) от поверхностных сопротивлений композитных углеродных структур

Согласно представлениям Фаулера – Нордгейма полевой ток j описывается формулой [85]:

$$J = A \frac{E_i^2}{\varphi} \cdot \exp(-B\varphi^{3/2}/E_i) \quad (2.1)$$

где A, B – некоторые коэффициенты, φ – потенциал работы выхода электрона из материала катода, E_i – электрическое поле на отдельном (усредненном) микровыступе катодной структуры. Коэффициент усиления поля K , зависящий от морфологии поверхности, определяет напряженность электрического поля на эмитирующем выступе E_i в условиях приложенного внешнего поля E_0 :

$$E_i = K \cdot E_0 \quad (2.2)$$

На основании этого, выражение (2.1) для плотности тока от напряженности $j(E)$ будет иметь вид:

$$J = A \cdot \frac{(E_0 \cdot K)^2}{\varphi} \exp(-B\varphi^{3/2}/(E_0 \cdot K)) \quad (2.3)$$

Для металлических эмиттеров характерно протекание процесса взрывной эмиссии электронов [76], которая происходит в ходе катастрофического роста тока при повышении напряженности поля E_0 , когда прохождение тока приводит к вакуумному пробою и последующему разрушению эмиттера. Аналогичные процессы наблюдаются при больших напряженностях электрического поля в автокатадах на основе нанокompозитных углеродных пленочных структур [3]. В этих случаях разрушение пленочных структур происходит с кардинальными изменениями порога начала полевой эмиссии электронов и последующего предпробойного автоэмиссионного тока. Внешний вид области разрушения алмазографитовой катодной матрицы свидетельствует о типичном электротепловом механизме разрушения используемой пленочной структуры приведен на Рисунке 2.4.

Основываясь на выражении (2.3), полученные в экспериментах автоэмиссионные ВАХ можно аппроксимировать некоторыми экспоненциальными функциями вида:

$$J = C \exp(kx), \quad (2.4)$$

где C , k – некоторые коэффициенты, которые определяются коэффициентом усиления поля K и работой выхода, x – переменная величина, связанная с напряженностью электрического поля. В импульсных электрических полях x определяется амплитудой импульсов анодных напряжений. Коэффициент k , по существу, описывает крутизну экспоненты плотности автоэмиссионного тока от напряженности поля, которая характеризует скорость нарастания автоэмиссионного тока в зависимости от ее амплитуды (Рисунок 2.5).

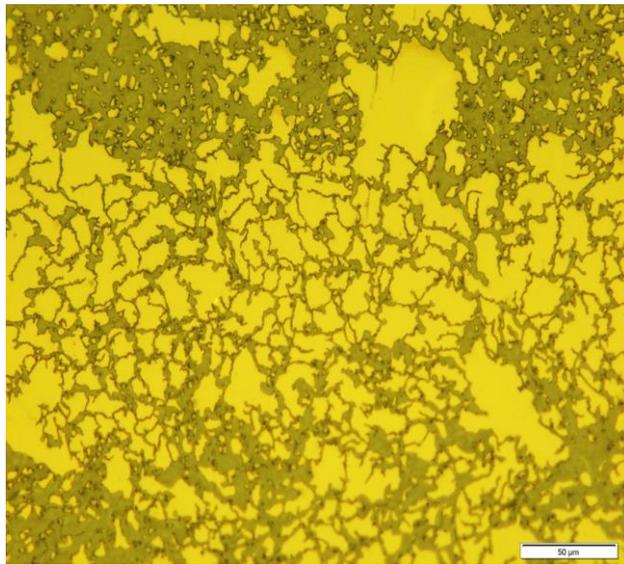


Рисунок 2.4. Изображение области электротеплового разрушения алмазграфитовой катодной матрицы после вакуумно-плазменного пробоя при экстремальной полевой эмиссии электронов

Для алмазграфитовых пленочных структур аппроксимация экспоненциальной функцией экспериментальных ВАХ дает зависимость коэффициента k от поверхностного сопротивления, которая приведена на Рисунке 2.6. Из сравнения этой зависимости с зависимостями на Рисунке 2.3 можно видеть, что минимальный предпробойный автоэмиссионный ток реализуется при наименьших сопротивлениях, когда скорость его увеличения в зависимости от напряженности анодного поля имеет наибольшее значение. С увеличением сопротивлений устойчивый максимальный ток увеличивается, а скорость его увеличения от напряженности анодного поля уменьшается. При сопротивлениях

около 400 кОм/□ реализуется максимальный устойчивый предпробойный ток при практически минимальных значениях коэффициента k . При дальнейшем увеличении сопротивлений наноуглеродных композитов наблюдается небольшое повышение скорости роста автоэмиссионного тока с увеличением напряженности поля с одновременным уменьшением максимальных автоэмиссионных токов.

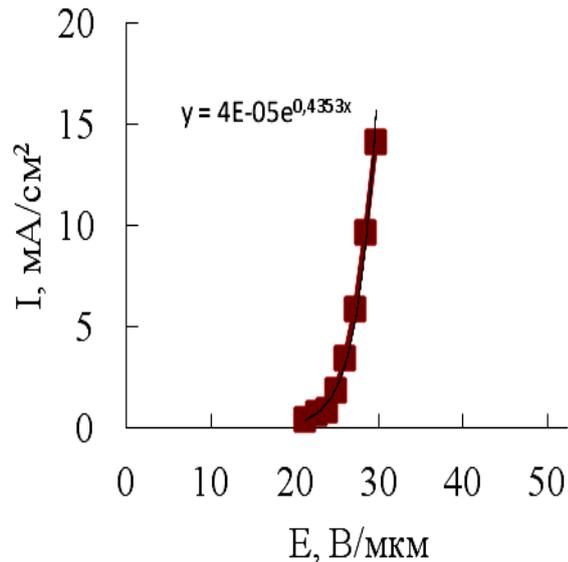


Рисунок 2.5. Пример аппроксимации экспоненциальной функцией экспериментальной ВАХ планарной алмазографитовой пленочной структуры (точками представлены экспериментальные результаты)

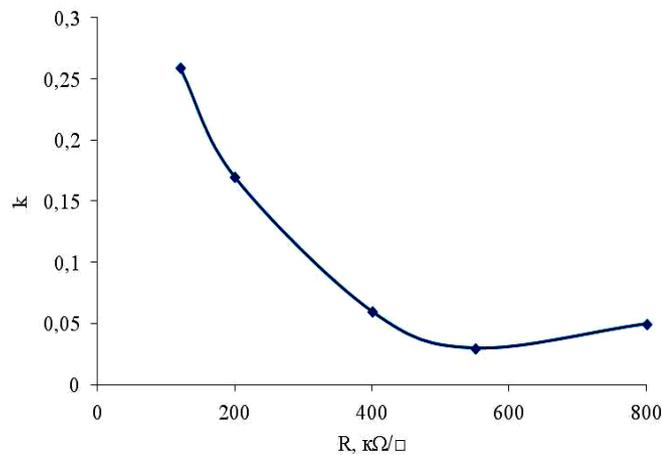


Рисунок 2.6. Зависимость крутизны ВАХ АЭК от удельного поверхностного сопротивления алмазографитовых пленочных структур

2.4 Механизмы, обеспечивающие взаимосвязи максимальных плотностей автоэмиссионных токов и крутизны ВАХ

Одной из главных отличительных особенностей композитных углеродных, а также других автоэмиссионных структур, обладающих полупроводниковыми свойствами, от металлических, является проникновение внешнего электрического поля в приповерхностную область [86, 87]. Дрейфующие под действием поля к эмиссионным центрам электроны заполняют акцепторные ловушки захвата и поверхностные состояния, которые возникли в слое алмазографитового композита при вакуумно-плазменном осаждении на диэлектрических подложках. Это приводит к возникновению эквивалентного внешнему полю электростатического потенциала, который экранирует остальной объем пленки от его проникновения. Пространственный заряд – ОПЗ создается перераспределением подвижных носителей в разрешенных зонах полупроводников, а также перераспределением зарядов на локальных энергетических состояниях в запрещенной зоне. Захваченные электроны способны создавать очень большой отрицательный поверхностный заряд. При их поверхностной концентрации порядка 10^{14} см⁻² возникает поле порядка $10^7 - 10^8$ В/см [86]. Такое поле существенно изменяет локальные электрические поля в приповерхностных областях автокатодов, увеличивает изгиб энергетических уровней, который, в свою очередь, приводит к изменению работы выхода для туннелирующих в вакуум электронов.

В сильных импульсных электрических полях дрейф электронов в твердом теле осуществляется с их разогревом и, при прочих одинаковых условиях, определяется электрофизическими свойствами катодных структур. Небольшие сопротивления углеродных 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 электронам при сравнительно небольшом увеличении напряженности анодного поля достичь энергии ионизации углеродных атомов и

создать условия для разрушения катодной микроструктуры по механизму ударной ионизации [86]. Поэтому автоэмиссионные ВАХ таких структур характеризуются высокой крутизной, низкими максимальными (предпробойными) токами и небольшим интервалом изменения напряженностей внешних электрических полей (Рисунки 2.3 и 2.6). Увеличение сопротивления до 400 кОм/□, вследствие снижения подвижности электронов, замедляет нарастание энергии электронов. Крутизна ВАХ при этом уменьшается. Для реализации условий ударной ионизации имеется возможность повышения амплитуды импульсов электрических полей. Это приводит к увеличению устойчивых максимальных автоэмиссионных токов. При сопротивлениях пленочных структур больше 400 кОм/□ рассеяние электронов на дефектах пленочной структуры еще больше увеличивается. Для достижения энергии ионизации электронами это позволяет еще больше увеличивать внешнее электрическое поле. Его увеличение возможно до тех пор, пока сильные электрические поля в приповерхностной области пленки не вызовут лавинообразный рост концентрации носителей заряда за счет эффектов Зинера и/или электростатической ионизации [86] и не приведут к возникновению электрических пробоев и разрушению наноуглеродных катодных матриц. При сопротивлениях больше 550 кОм/□ эффект от снижения энергии электронов за счет уменьшения длины свободного пробега компенсируется дальнейшим увеличением пробойной напряженности электрического поля. Это усиливает действие механизмов увеличения концентрации носителей заряда за счет эффектов Зинера и электростатической ионизации и выражается в небольшом увеличении скорости нарастания автоэмиссионного тока от напряженности анодного поля и дальнейшем уменьшении величин устойчивых предпробойных автоэмиссионных токов (Рисунки 2.3 а и 2.6).

2.5 Выводы к главе 2

1. С использованием микроволновой плазмы паров этанола низкого давления определены области режимов, обеспечивающих получение композитных нанокристаллических 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 методики исследования автоэмиссионных характеристик источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур с различными 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 анодных полей. Показано, что максимальные автоэмиссионные токи в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности реализуются при оптимальных значениях поверхностных электропроводностей наноуглеродных структур.

3. Показана принципиальная возможность увеличения прозрачности потенциального барьера на границе твердое тело-вакуум без повышения напряженности внешнего электрического поля. Получение в микроволновой плазме паров этанола алмазных нанокристаллитов с размерами меньше дебаевской длины экранирования улучшает поверхностную проводимость композитной пленочной структуры и уменьшает работу выхода электронов. Уменьшение рабочих напряжений увеличивает запас электрической прочности синтезированных пленочных алмазографитовых структур, стабильность и долговечность автоэмиссионных катодов, изготовленных на их основе.

4. Рассмотрены механизмы, определяющие взаимосвязь максимальных плотностей автоэмиссионных токов и крутизну ВАХ. Полученные результаты интерпретированы особенностями влияния параметров импульсного воздействия сильных электрических полей на механизмы рассеяния и концентрацию дрейфующих в твердом теле электронов.

Глава 3 Фундаментальные факторы, ограничивающие максимальную плотность тока, стабильность и долговечность композитных алмазграфитовых АЭК

3.1 Состояние и перспективы использования лезвийных АЭК в устройствах суб- и терагерцовом диапазонах частот

На сегодняшний день мировой промышленностью выпускается ограниченное число изделий, работающих в суб- и терагерцовом диапазонах частот [88]. Они имеют небольшую выходную мощность, которая в большинстве своём не превосходит нескольких милливатт. Разработки изделий, имеющих более высокую мощность, проводятся на основе существующих миниатюрных моделей приборов, таких как ЛОВ или ЛБВ. Высокочастотность таких изделий определяет их компактный размер, следствием чего становится необходимым использование электронных пучков с высокой плотностью тока. Этому условию могут удовлетворить, так называемые, лезвийные АЭК. Ленточные пучки лезвийных АЭК, кроме высокой плотности тока, позволяют в значительной степени снизить плотность заряда в пучке. Это облегчает его фокусировку и транспортировку в пространстве взаимодействия с электромагнитным сигналом.

Значительное число исследований, проведённых за рубежом подтверждают перспективность создания СВЧ устройств, работающих с ленточным электронным потоком [89-94]. В ряде работ [89-95] исследовалась возможность создания мощной ЛБВ с плоским электронным пучком. Существуют работы, связанные с расчётом электронной пушки, формирующей ленточный пучок [94], исследовалась возможность изготовления ЗС с помощью различных технологий [93], проводилось моделирование транспортировки ленточного пучка вдоль ЗС [92]. Несмотря на значительный интерес к подобного рода исследованиям, большинство полученных результатов носит теоретический характер. По-видимому, наибольшие сложности при создании подобного рода изделий связаны

с формированием и транспортировкой электронного потока. Очевидно, что на транспортировку пучка большое влияние оказывает процесс его формирования вблизи поверхности катода.

Применение известных и хорошо изученных технологий производства таких эмиттеров, как металлопористые катоды, для создания источника электронов узкой протяженной формы видится затруднительным. Значительно более перспективным видится использование других известных типов катодов – оксидных. В отличие от металлопористого катода, который представляет из себя сложную структуру, полученную путём прессования порошка с последующей пропиткой пористого тела активным веществом, оксидный катод представляет из себя плёночное соединение, осажденное на подложку. Геометрическая конфигурация катода может задаваться размерами подложки, и ограничена, в основном, возможностями металлообработки. Основным недостатком оксидного катода является ограничение по величине отбираемого с его поверхности тока. Превышение предельно допустимого токоотбора в непрерывном режиме свыше 1-2 А/см² приводит к перегреву активных участков катода за счёт их резистивного нагрева протекающим током. При этом начинает протекать химическая реакция слоя оксида с материалом подложки и веществами, находящимися в газообразном состоянии вблизи эмитирующей поверхности, в результате которой на эмитирующих участках образуется новый материал, работа выхода которого превосходит величину, изначально характеризующую данные участки. Такие процессы приводят к деградации эмиссионного тока катода. В связи с этим большинство оксидных катодов имеет рабочий режим непрерывного отбора тока на уровне не выше 1 А/см² или работают в импульсном режиме токоотбора.

Примером использования оксидного катода для получения ленточного электронного пучка служат циклотронные защитные устройства, работающие в СВЧ-диапазоне длин волн [96, 97]. Устройство используется как защита радиолокационных станций от воздействия входной мощности большого уровня.

В [96] приведён режим токовой нагрузки на оксидный катод, которая в импульсном режиме работы соответствовала токоотбору до $1,8 \text{ А/см}^2$.

Таким образом, задачи, связанные с разработкой, созданием, а также исследованием физических свойств ленточных катодов являются актуальными.

3.2 Влияние электрофизических свойств алмазографитовых планарно-торцевых АЭК на характер их разрушений в экстремальных условиях эксплуатации

Применение полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схемотехническим требованиям, в составе электронных устройств различного назначения предполагает наличие у них высоких воспроизводимости эмиссионных параметров, стабильности и необходимого ресурса долговечности. Стабильность и долговечность полевых источников электронов чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии эмиссионных центров и к состоянию поверхности, которая подвергается в процессе работы различным деструктивным воздействиям [98]. Помимо этого, работа автоэмиссионных катодов сопровождается целым рядом явлений, таких как ионная бомбардировка эмитирующей поверхности, процессами адсорбции и десорбции атомов и молекул остаточных газов, миграцией атомов по поверхности, а также другими явлениями. Вышеперечисленные процессы, в своей совокупности или по отдельности, приводят к эффектам, изменяющим режим работы конкретной конструкции устройства. К таким эффектам можно отнести распыление катодного материала с электрода эмиттера, перестройка топографии поверхности, выраженная в изменении местоположения и числа эмиссионных образований, изменении их работы выхода, а также сильный нагрев катода и проявление напряжений электрического и механического характера [99]. Условия технического вакуума, а также высокие напряженности электрических полей оказывают сильное влияние на функционирование сильноточных автоэмиссионных катодов.

Особенностью сильноточной эмиссии наноалмазографитовых автокатодов является высокая крутизна ее ВАХ [8, 100]. Прекращение стабильной, с высокими значениями тока, автоэлектронной эмиссии из алмазографитового катода, может иметь место при возникновении быстротекущего неуправляемого процесса, вызванного колебаниями напряженности электрического поля [101]. Последующие включения такого катода демонстрируют кардинально отличные автоэмиссионные параметры и режимы функционирования устройства, в котором он применяется. Зачастую такое изменение эмиссионных параметров приводит к потере работоспособности электронного устройства [102, 103].

На Рисунке 3.1 приведены схемы исследованных планарно-торцевой и лезвийной эмиссионных структур на основе алмазографитовых пленочных композитов на поликорковых подложках. При толщине порядка 100 нм поверхностное сопротивление низкоомных наноалмазографитовых пленок составляло 120 кОм/□, а для высокоомных структур находилось на уровне 1,2 МОм/□.

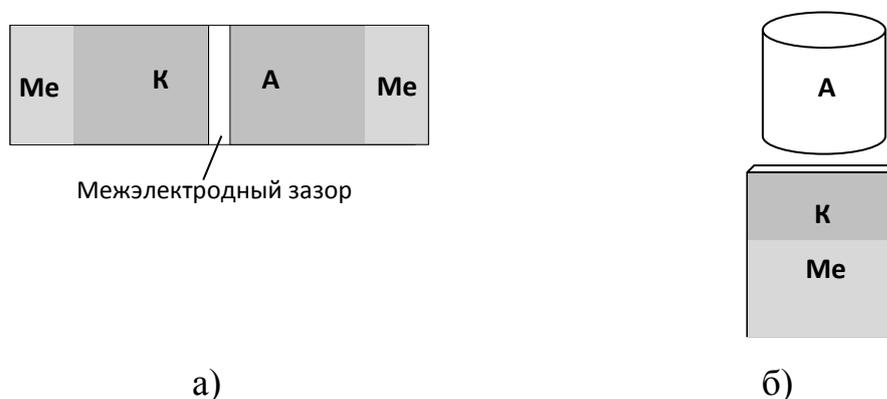


Рисунок 3.1. Схематическое изображение автоэмиссионных структур планарно-торцевой (а) и лезвийной (б) конструкций, выполненных на основе алмазографитовых нанокомпозитов. Обозначения на рисунке: А – анод, К – катод, Ме – тонкопленочный металлический электрод

Межэлектродный зазор между частями углеродной пленки, образующей планарно-торцевую структуру, имел размер порядка 40-50 мкм. Роль анода

выполняла та часть пленки, на которую подавался положительный потенциал, другая часть пленки становилась катодом (Рисунок 3.1 а). Измерения автоэмиссионных характеристик производились при давлении $(2-4) \cdot 10^{-3}$ Па. Между катодом и анодом с высоковольтного характериографа Эрбий-7176 подавались импульсы напряжения длительностью 10 мкс и амплитудой от 0 до 3000 В.

На Рисунке 3.2 приведены ВАХ планарно-торцевых автоэмиссионных структур на основе алмазграфитовых пленочных структур с различными удельными поверхностными сопротивлениями. Алмазграфитовые тонкопленочные наноккомпозиты с низким сопротивлением демонстрируют начало полевой эмиссии при напряженности электрического поля порядка 10 В/мкм. При этом напряженности электрического поля 12 В/мкм вполне достаточно, чтобы максимальный допробойный ток I_{max} достигал величины 4 мА. Разность между напряжением получения максимального допробойного тока автоэмиссии и пороговым напряжением начала эмиссии, является диапазоном рабочих напряжений ΔU , который для низкоомных структур составляет порядка 350 В. Работа в пределах этого диапазона напряжений позволяет получать устойчивую автоэлектронную эмиссию.

Катоды, в основе которых лежит высокоомный тонкопленочный алмазграфитовый наноккомпозит, начинают эмитировать при напряженности электрического поля порядка 24 В/мкм. А максимальное значение допробойного тока I_{max} было достигнуто при напряженности электрического поля порядка 70 В/мкм и составило около 4 мА. Дальнейшее увеличение напряженности поля не приводит к существенному росту тока, но приводит к видимым искровым пробоям между катодом-анодом. Стабильная автоэлектронная эмиссия, в случае катодов с высоким сопротивлением алмазграфитового композита, наблюдалась в диапазоне рабочих напряжений порядка 1500 В.

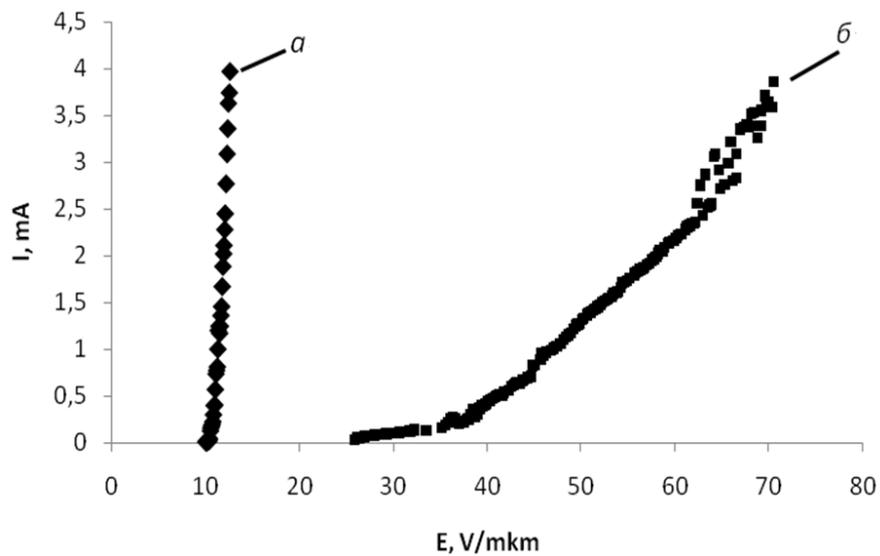


Рисунок 3.2. Вольт-амперные характеристики автоэлектронной эмиссии, снятые для планарно-торцевых структур с сопротивлением алмазографитового композита: $120 \text{ кОм}/\square$ (а) и $1,2 \text{ МОм}/\square$ (б)

На Рисунке 3.3 показано нарушение целостности частей алмазографитовой пленки различного поверхностного сопротивления, на катодной стороне структуры. Вышеприведенные фотографии, полученные с помощью оптического микроскопа, демонстрируют состояние эмитирующей поверхности после прохождения нескольких вакуумно-плазменных пробоев, возникших в результате приложения импульсов напряжений с нарастающей амплитудой.

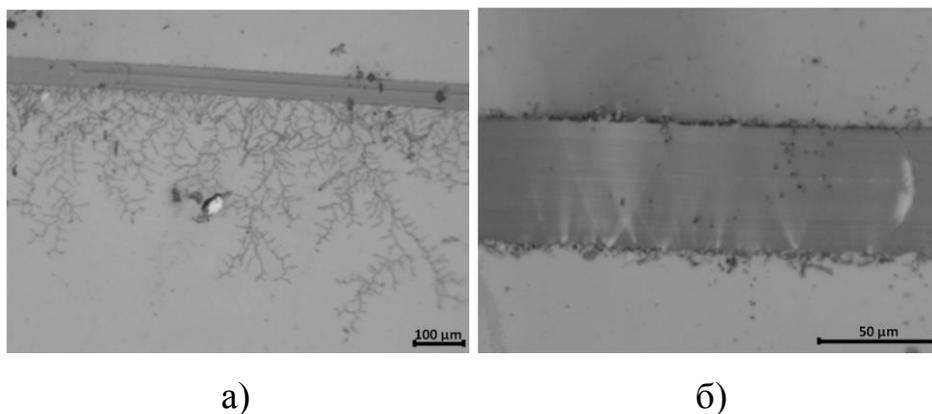


Рисунок 3.3. Изображения участков разрушений катодных областей низкоомной (а) и высокоомной (б) алмазографитовых пленочных структур при возникновении режимов неустойчивой автоэмиссии

Для низкоомных образцов после возникновения неустойчивости характерно появление на катодной части пленки «сетки», которая напоминает фигуры Лихтенберга (Рисунок 3.3 а). Последние, как известно, возникают в ходе протекания скользящего поверхностного электрического разряда [104] и, как правило, наблюдается при электротепловом пробое тонких диэлектрических покрытий. Размеры «сетки» в направлении от межэлектродного промежутка и напряженности полей начала автоэмиссии после каждого электротеплового пробоя увеличиваются, что, вероятнее всего, связано с ухудшением электропроводности катодной части пленки, разрушением первоначально эмитирующих выступов и уменьшением коэффициентов усиления поля на оставшихся наиболее выступающих шероховатостях ее края. При таких изменениях торцевой части пленки, как со стороны катода, так и со стороны анода, происходит снижение напряженности электрического поля, что приводит к смещению пороговых напряженностей в область больших значений (Рисунок 3.4).

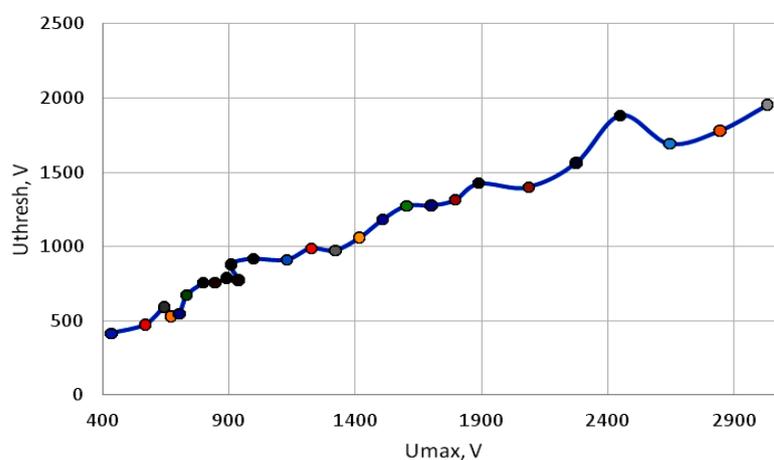


Рисунок 3.4. Зависимость пороговых напряжений начала полевой эмиссии от напряжений возникновения последовательных электротепловых пробоев

Для высокоомных образцов разветвленная сетка электротепловых электрических пробоев отсутствует (Рисунок 3.3 б). Отличительной особенностью образцов с высоким сопротивлением алмазографитового композита является возникновение эрозионных областей на краю катодного участка пленки с

образованием следов в виде конусов с вершиной со стороны катода. Эти области возникают в результате появления быстропротекающей неустойчивости эмиссионного тока с резким возрастанием его величины при воздействии сильных импульсных электрических полей. Эти конические следы различаются величиной угла при вершине и своей протяженностью, определяемой силой эрозионного влияния. По всей видимости, появление плазменных катодных факелов [105, 106], с последующим оседанием распыленного материала в межэлектродной области, приводит к формированию эрозионных участков, обусловленных явлениями взрывной эмиссии. С целью подтверждения данного предположения был изучен элементный состав поверхности планарно-торцевой эмиссионной структуры, включающей катод, анод и пространство между электродами. Эти исследования имеют значительный фундаментальный и практический интерес.

На Рисунке 3.5 а) показано распределение содержания углерода по высоте одного из эрозионных конусов, приведенных на Рисунке 3.3 б), для высокоомной алмазографитовой планарно-торцевой структуры, полученное исследованием элементного состава эрозионных конусов с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскоп MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. На областях 3, 4 Рисунков 3.5 а) и 3.5 б) можно видеть, что на катодной и анодной частях пленки содержание углеродной компоненты практически одинаково, а в межэлектродном промежутке имеет место ее снижение по направлению от катода к аноду (см. области 8-10 на Рисунках 3.5 а) и 3.5 б). Стоит отметить, что концентрация углеродной фазы на краю анодной части пленки больше (область 12, Рисунок 3.5 а), чем в изначальной пленке. На областях 1, 2 Рисунков 3.5 а) и 3.5 б) видно, что в межэлектродном промежутке, за пределами эрозионных областей, содержание углеродной компоненты имеет минимальное значение.

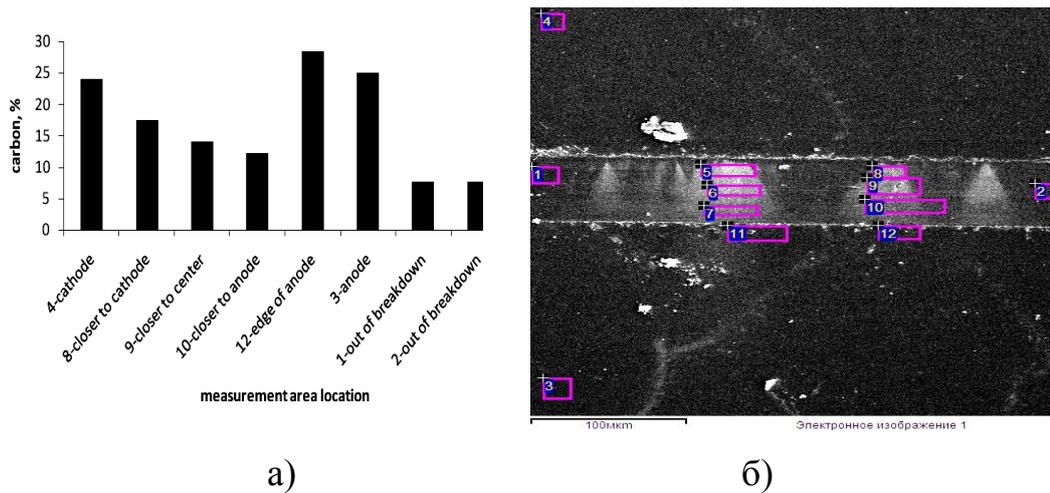


Рисунок 3.5. Гистограмма распределения углеродной фазы по одному эрозионному конусу высокоомной планарно-торцевой алмазграфитовой автоэмиссионной структуры (а) с указанием областей проведения элементного анализа (б)

3.3 Вакуумно-плазменные процессы при экстремальной полевой эмиссии в лезвийных алмазграфитовых источниках электронов

Исследования сильноточной полевой эмиссии электронов лезвийных алмазграфитовых катодов проводились при давлении в вакуумной камере $(3-4) \cdot 10^{-5}$ Па с использованием источника питания постоянного тока с пошаговым подъёмом напряжения и выдержкой на каждом напряжении по 5-10 мин в случаях, когда ток был нестабильным, что позволяло отформовать катод [107]. Установлено, что при превышении напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре 35 В/мкм наблюдалось появление свечения вдоль торца алмазграфитовой пленки (Рисунок 3.6). При увеличении напряженности поля ток и интенсивность свечения возрастали. При этом ток автоэлектронной эмиссии, достигнув уровня 5,8 мА, несмотря на постоянство приложенного напряжения, начинал спонтанно увеличиваться. Со временем скорость роста увеличивалась, а величина порядка 10 мА была достигнута за время 5-7 мин. Нужно отметить, что

самопроизвольный рост тока сопровождается ростом давления остаточных газов внутри измерительного устройства. При росте тока от 5,8 до 10 мА давление увеличилось с $3 \cdot 10^{-5}$ до $7 \cdot 10^{-5}$ Па.



Рисунок 3.6. Катодное свечение при автоэмиссионном токоотборе 1450
А/см²

Путем поэтапного снижения напряжения была замерена ВАХ алмазграфитовой структуры (Рисунок 3.7). Линейный характер ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма позволяет заключить, что в исследованном диапазоне напряженностей электрических полей ток является автоэмиссионным (Рисунок 3.7 б), и даже, несмотря на катодное свечение, вероятное присутствие термоэмиссионного тока не вносит значимого вклада в ВАХ.

Для выяснения природы свечения после экспериментов и демонтажа вакуумного измерительного устройства проведены исследования элементного состава поверхности металлического анода. На Рисунке 3.8 представлена светлая, узкая и протяженная область на поверхности анодного электрода, соответствующая торцевой части подложки поликора. Левее можно наблюдать локальное потемнение. Напротив, этой области была расположена сторона подложки с углеродной нанокompозитной пленкой. В областях потемнения поверхности анода установлено наличие углеродной фазы.

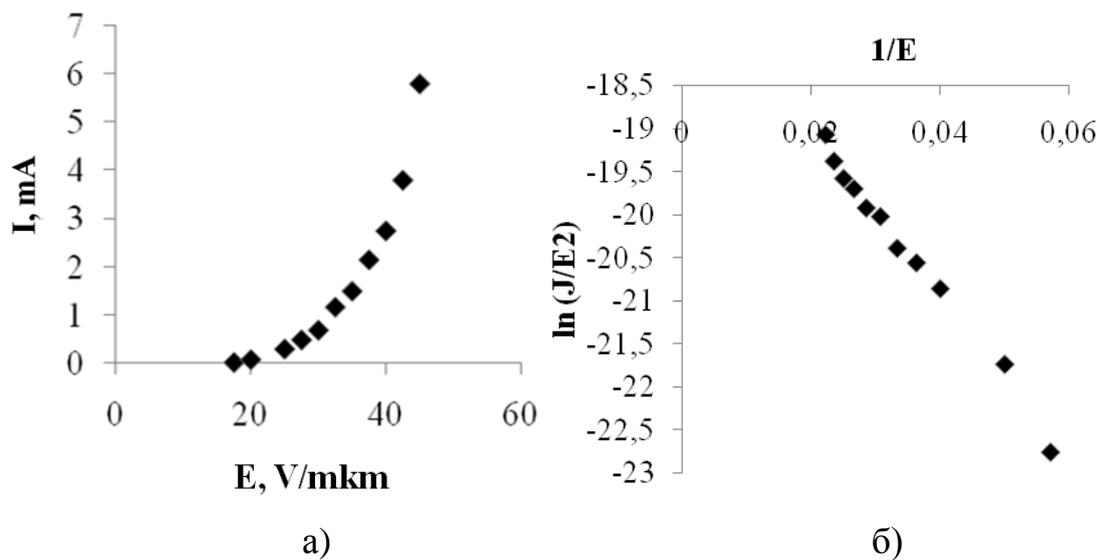


Рисунок 3.7. Зависимости автоэмиссионных токов от напряженности электрического поля лезвийного алмазграфитового АЭК: в линейных координатах (а); в координатах Фаулера – Нордгейма (б)

Присутствие на анодном электроде углеродной компоненты свидетельствует о распылении с эмитирующей поверхности атомов углерода. Вероятнее всего распылению подвергается графитовая компонента алмазграфитовой матрицы. В защиту этого предположения говорит высокая стабильность измеренной вольт-амперной характеристики, в совокупности с ее непрерывностью. В случае, если эмиссия происходила бы и с графитовых микрообразований в том числе, то ВАХ изменялась бы со временем. В силу низкой, по сравнению с наноалмазным окружением, теплопроводности графитовой компоненты, происходит ее активное распыление, вызванное нагревом до высоких температур и влиянием ионных ударов. Распыление графитовой компоненты пленки приводит к тому, что выделившиеся атомы углерода, под действием автоэмиссионных электронов ионизируются, а при последующей рекомбинации образуют светящиеся катодные факелы. Вершинами этих катодных факелов, скорее всего, являются наноалмазные кристаллиты, выполняющие роль эмиссионных центров [76].

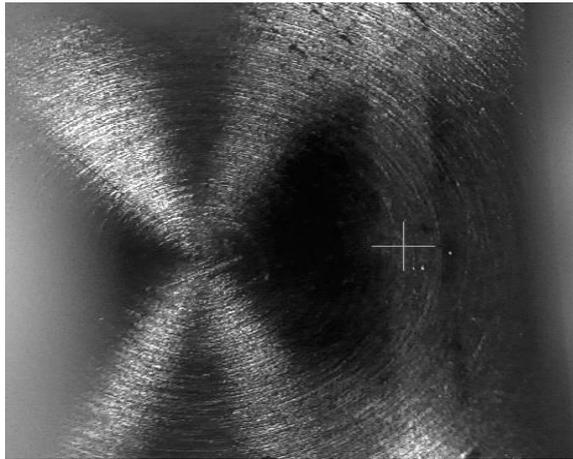


Рисунок 3.8. Оптическая микроскопия анодной поверхности после проведения сильноточной торцевой автоэмиссии

3.4 Выводы к главе 3

1. Поверхностное сопротивление наноалмазографитовых пленочных структур определяет особенности вольт-амперных характеристик, в первую очередь их крутизну, а также вид повреждений пленки в экстремальных условиях сильноточной эксплуатации. Показано, что наноалмазографитовые композиты с низким сопротивлением, по сравнению с высокоомными структурами, имеют более низкий порог начала полевой эмиссии, демонстрируют более сильную крутизну вольт-амперной характеристики, что обеспечивает достижение максимального эмиссионного тока при меньшей напряженности электрического поля.

2. Интервал рабочих напряжений, который способен обеспечивать одинаковый максимальный автоэмиссионный ток, у высокоомных источников электронов в несколько раз больше, чем у низкоомных. Такие различия дают возможность использовать алмазографитовые пленочные структуры в случаях конструирования электронных устройств, имеющих различные схемотехнические требования к АЭК.

3. Тонкопленочные углеродные структуры, в зависимости от величины поверхностного сопротивления, имеют различающийся характер процессов, протекающих в условиях экстремальной автоэлектронной эмиссии. Алмазографитовые тонкопленочные нанокомпозиты с низким сопротивлением, эксплуатируемые в критических режимах функционирования полевых планарно-торцевых эмиссионных структур, демонстрируют на катодной части пленки «сетку» пробоев электро-теплого характера, вызванную протеканием по поверхности скользящего электрического разряда, аналогично тому, как это происходит в тонких непроводящих пленках. Это явление можно считать ключевой причиной нестабильной автоэмиссии, и последующего разрушения катода.

В высокоомных алмазографитовых пленочных структурах разветвленная сетка электротепловых электрических пробоев, как правило, отсутствует. Для этой ситуации, равно как и в случае лезвийной конструкции автоэмиссионной структуры, эрозия катодной части пленки, в той области, откуда идет эмиссия электронов, является основным типом разрушения в ходе предельных режимов эксплуатации. Взрывная эмиссия электронов, с наибольшей долей вероятности осуществляется с наноалмазов, находящихся в композитной углеродной матрице, и выполняющих роль центров эмиссии. Этот взрывной процесс сопровождается появлением факела катодной плазмы с последующим переносом графитовой составляющей углеродной пленки в межэлектродное пространство и на поверхность анода.

4. На основании полученных результатов можно проводить прогнозирование долговременности работы сильноточных автоэмиссионных катодов, а также их стабильности в зависимости от принятого конструкционного решения и электрофизических свойств тонкопленочных углеродных нанокомпозитных структур.

Глава 4 Эмиссионные характеристики источников электронов на основе алмазграфитовых композитов и их долговременная воспроизводимость

4.1 Исследование долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик МПК и сильноточных алмазграфитовых АЭК с плотностью тока не менее 100 А/см²

Электривакуумные приборы, безусловно, чувствительны к вакуумным условиям эксплуатации, их основной принцип работы связан с баллистическим транспортом электронов. Ухудшение вакуума в значительной степени влияет на качество работы приборов и сокращает срок службы. К причинам снижения вакуума можно отнести как механические повреждения корпуса устройства, что приводит к возникновению натеканий, так и некачественная дегазация внутренних элементов устройства. Причиной возникновения последнего, в частности, возможно наличие полостей («карманов») с газом в сварных швах или структуре материала, что впоследствии может привести к увеличению давления до определённой величины, после которой может стабилизироваться уровень вакуума [108]. Стабилизированный уровень вакуума зависит от ряда параметров, к их числу относятся источник газоотделения, наличия поглотителей газа, а также объём устройства и некоторые другие. Величина установившегося давления определяет последующую работоспособность устройства. Этот недостаток можно устранить путем установки в устройство компактных насосов, поддерживающих рабочий уровень вакуума. Недостатком этого решения является рост массогабаритных показателей устройства, а также снижение его надёжности из-за увеличения числа составляющих устройство элементов. Поэтому одна из главных задач современного вакуумного производства состоит в создании источников электронов, способных функционировать в условиях критического вакуума.

В настоящее время, в большинстве производимых в мире ЭВП, в том числе СВЧ диапазона длин волн, применяются термоэмиссионные МПК с различными добавками, которые, как уже говорилось, предназначены для уменьшения температурного коэффициента работы выхода электронов и которые, как правило, имеют низкие температуры сублимации. Ключевое требование, которое предъявляется к металлопористым катодам, заключается в повышении плотности выдаваемого тока, а оно достигается в ходе роста рабочей температуры катода. Это приводит к росту скорости испарения активного вещества, входящего в состав МПК, и, с учетом его ограниченного количества при малых габаритах ЭВП, ухудшению его рабочих характеристик и уменьшению срока службы.

С точки зрения баллистического транспорта в вакууме источники электронов на основе МПК и АЭК являются практически равноценными, но механизмы, лежащие в основе процесса эмиссии электронов данными катодами, имеют принципиальные различия. В основе термоэлектронной эмиссии лежат диффузионные процессы на поверхности катода, происходящие при высоких температурах, и небольшие изменения уровня вакуума не оказывают критического влияния на эмиссию электронов. При этом известно, что для процессов термоэлектронной эмиссии характерным является сильная неоднородность в величинах скоростей эмитированных электронов, что считается одним из недостатков термоэмиссии. Более того, этот недостаток проявляется еще сильнее при ухудшении вакуумных условий из-за столкновения электронов с атомами и молекулами остаточных газов.

Также нужно учесть, что работа автоэмиссионных катодов сопровождается целым рядом явлений, таких как ионная бомбардировка эмитирующей поверхности, процессами адсорбции и десорбции атомов и молекул остаточных газов, миграцией атомов по поверхности, а также другими явлениями. Необходимо иметь в виду, что вышеперечисленные процессы могут существенно изменять режим автоэлектронной эмиссии. Во многом это зависит от конструкции и режима эксплуатации автоэмиттера, а также от количества

воздействующих факторов и их совокупности. Для сильноточных полевых эмиттеров, работающих при высоких напряженностях электрических полей, а также в условиях технического вакуума, изменения режима автоэлектронной эмиссии являются очень значимыми. Главным отличием катодов, работающих на принципах автоэлектронной эмиссии, от термоэмиссионных катодов, является низкий разброс эмитированных электронов по энергиям и направлениям [85].

Исследование влияния вакуумных условий эксплуатации на рабочие характеристики МПК и алмазграфитовых АЭК проводились на установке, включающей высоковольтный источник питания постоянного тока и вакуумную камеру со смотровым окном и системой откачки на основе магнеторазрядного насоса (Рисунок 4.1). К вакуумной камере подведен сетевой азот. Влияние давления азота на эмиссионные характеристики АЭК было исследовано на образце, полевая эмиссия в котором происходила с торца алмазграфитовой пленки толщиной 80-100 нм [109].

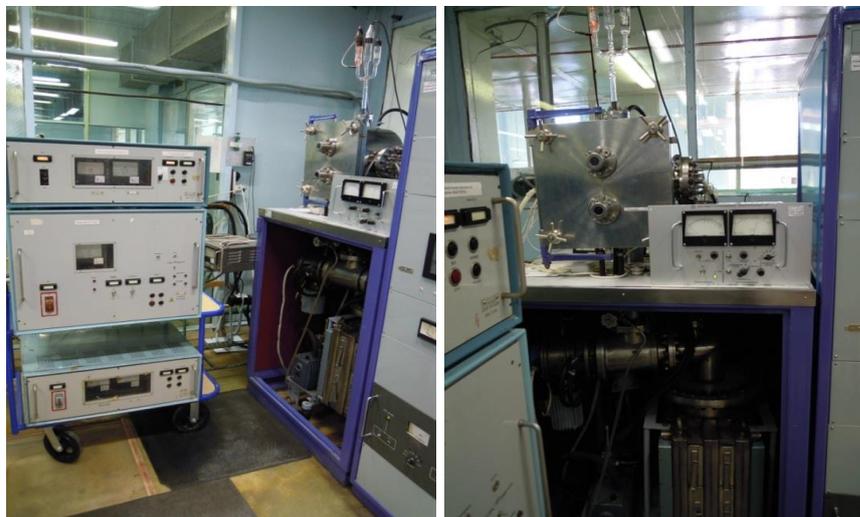


Рисунок 4.1. Установка для исследований долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик МПК и сильноточных алмазграфитовых АЭК

На Рисунке 4.2 приведены зависимости относительных изменений эмиссионных токов от остаточного давления в ЭВП СВЧ для полевого

алмазграфитового и двух термоэмиссионных МПК с диодным токоотбором [110,111]. Ток термоэмиссии в обоих МПК был на уровне 31 мА, напряжение составляло несколько десятков вольт. Можно заметить, что давление выше $2 \cdot 10^{-4}$ Па для термоэмиссии является критичным, при этом для автоэмиссии критичным будет являться давление, выше в несколько раз. При давлении около $4 \cdot 10^{-3}$ Па термоэмиссионный катод перестаёт эмитировать полностью, тогда как для АЭЖ наблюдается падение тока примерно на 50%, а отсутствие эмиссии не отмечалось даже при $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

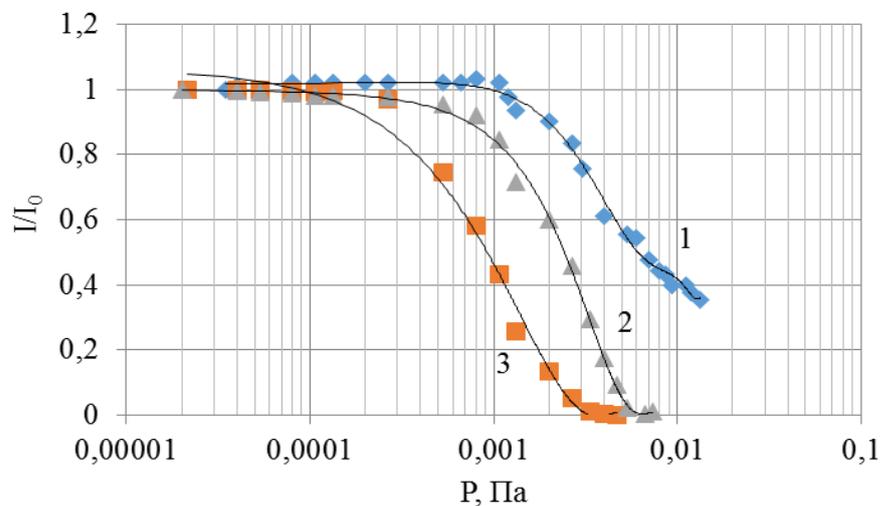


Рисунок 4.2. Зависимость относительной эмиссионной способности (I/I_0) автоэмиссионного (1) и металопористого (2,3) катодов от остаточного давления в электро-вакуумном приборе

Зависимости токов автоэлектронной эмиссии от давления остаточного газа, в условия напуска и откачке азота, приведены на Рисунке 4.3. В этих экспериментах между катодом и анодом подавалось такое напряжение, чтобы эмиссионный ток был около 1 мА. При такой величине тока, расчетная плотность тока составляла порядка 180 А/см^2 . Для каждого давления производилась выдержка в течение 5-10 сек., чтобы имела место стабилизация тока автоэлектронной эмиссии, а также давления остаточных газов. После фиксации тока при $1 \cdot 10^{-2}$ Па подача газа в вакуумную камеру прекращалась, а последующие

измерения зависимости тока от давления производились без напуска азота. Из Рисунка 4.4 можно видеть, что напуск азота от начального давления в рабочей камере $2,6 \cdot 10^{-5}$ Па до давления около $8 \cdot 10^{-4}$ Па не является критичным для автоэмиссионного тока. При повышении давления до $1 \cdot 10^{-2}$ Па наблюдается практически линейное уменьшение автоэмиссионного тока, который после откачки вакуумной камеры начинает восстанавливаться. При этом, восстановившийся ток автоэлектронной эмиссии на 50% ниже, чем измеренный перед напуском азота.

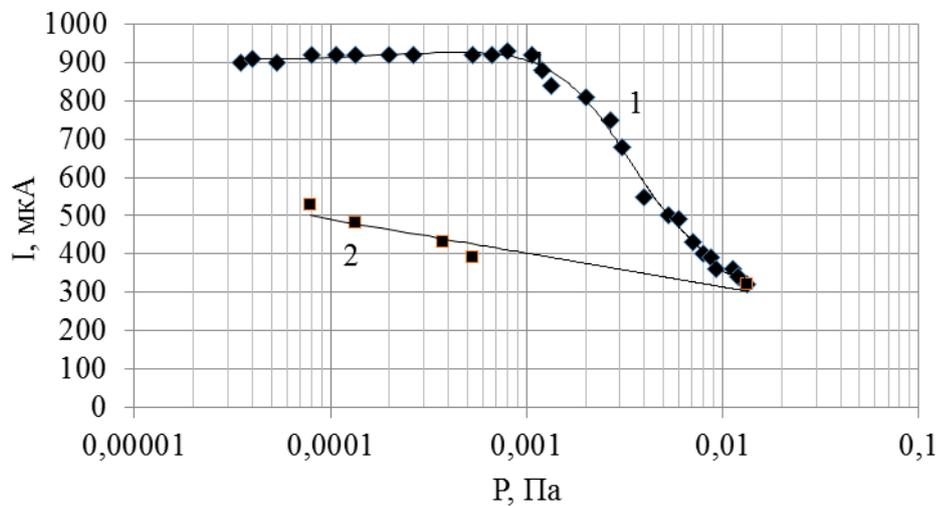


Рисунок 4.3. Зависимость полевого тока от остаточного давления для алмазграфитового АЭЖ: 1 – при напуске азота; 2 – при откачке азота

На Рисунке 4.4 приведены ВАХ алмазграфитового АЭЖ, полученные перед началом экспериментов с определением влияния давления в вакуумной камере при напуске и откачке азота на автоэмиссионный ток и после его окончания. Из Рисунка 4.4 видно, что напуск азота, и его последующая откачка неблагоприятно влияют на порог начала автоэмиссии и величину тока. Впрочем, несмотря на это эмиссионный процесс носит автоэмиссионный характер, о чем свидетельствует ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма. Трансформация автоэмиссионной ВАХ при напуске и откачке азота в ЭВП, как показывает анализ, может быть следствием увеличения поверхностного сопротивления эмиссионной структуры,

обусловленного бомбардировкой высокоэнергетичными ионами азота с образованием нитридов углерода. В свою очередь, термоэмиссионные катоды, после восстановления вакуумных условий, демонстрируют восстановление тока до изначального уровня за время около 3 мин.

Надо заметить, что в некоторых приборах, в том числе, не оборудованных собственными средствами откачки, способность восстановления тока менее важна, чем стабильность эмиссии в неблагоприятных вакуумных условиях. Актуальным является исследование работоспособности алмазграфитовых АЭК при неблагоприятных вакуумных условиях в течение длительного времени при натекании других газовых сред. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения их использования в ЭВП, длительность работы которых составляет несколько секунд.

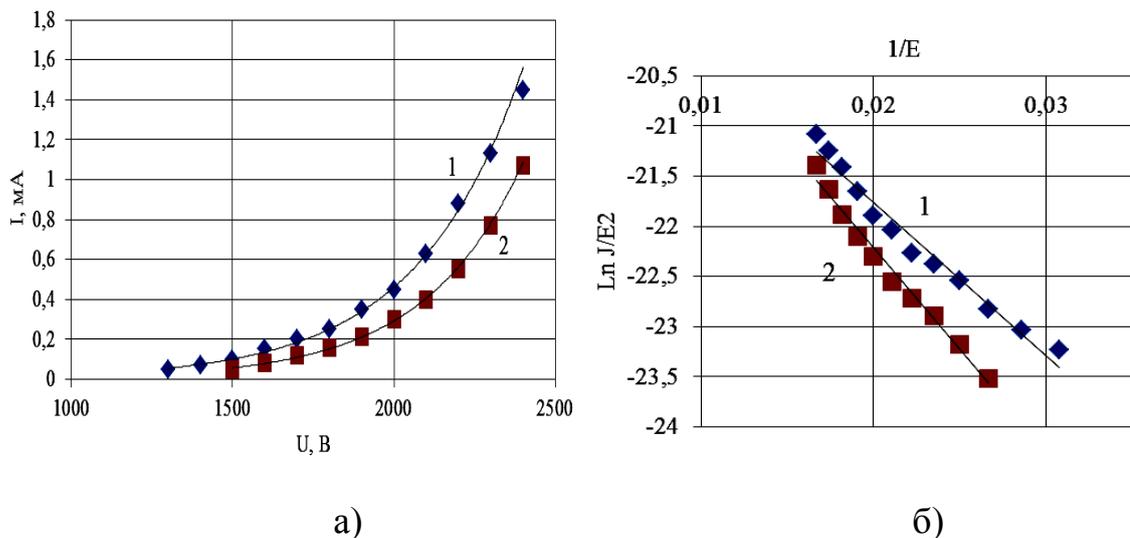


Рисунок 4.4. ВАХ АЭК в линейных (а) и координатах Фаулера – Нордгейма (б) до напуска азота (1) и после напуска азота (2)

4.2 Исследование долговременной воспроизводимости эмиссионных характеристик сильноточных алмазграфитовых АЭК с аварийным отключением питающего напряжения и средств откачки

Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик АЭК с плотностью автоэмиссионного тока более 100 А/см^2 в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации проводились при циклических изменениях вакуума в диапазоне от $9 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ при работающем высоковакуумном насосе до $0,1 \text{ Па}$ к концу периода испытаний [112]. Имитация условий аварийного отключения питающего напряжения и средств откачки описана ниже. Испытания автоэмиссионного катода при фиксированном напряжении в течение $0,5\text{-}3$ часа в зависимости от цикла, завершались измерением ВАХ с последующим отключением напряжения. Повышение давления в камере до величины $0,1 \text{ Па}$ происходило в результате отключения средств откачки после остывания измерительного устройства. Испытательные циклы, включавшие в себя откачку, подъём напряжения, выдержку при поданном напряжении и измерения ВАХ многократно повторялись. Всего выполнено 8 циклов испытаний.

В качестве АЭК использовались алмазграфитовые структуры толщиной около 100 нм . Для приложения катодного потенциала, на расстоянии 7 мм от эмитирующей части углеродной композитной пленки, методом термовакuumного испарения осаждалась металлическая площадка (Рисунок 4.5).

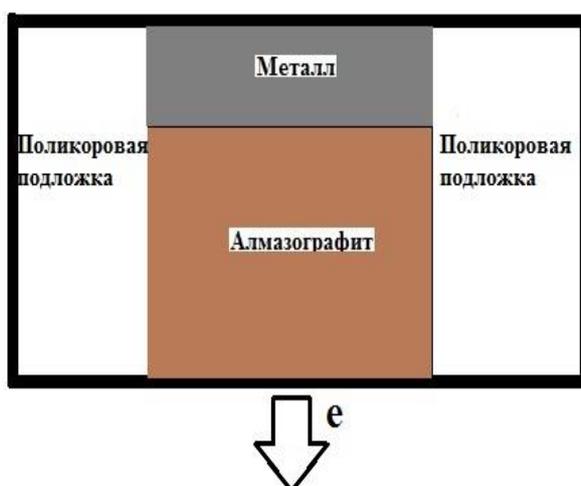


Рисунок 4.5. Схематичное изображение лезвийного алмазграфитового АЭК

Межэлектродный зазор между лезвийным АЭК и анодом из молибдена диаметром $5,5 \text{ мм}$ составлял 40 мкм . При использовании источника питания

постоянного напряжения и давления в вакуумной камере $(3\div 4)\cdot 10^{-5}$ Па производились автоэмиссионные измерения. В состав измерительной части установки также входили высоковольтный делитель напряжения, записывающий многоканальный осциллограф, измерительное сопротивление ПЭВ-100 с номиналом 5 кОм.

Общее обезгаживание измерительного устройства производилось с помощью встроенных нагревателей и при остаточном давлении порядка $1,6\cdot 10^{-5}$ Па, а последующая дегазация анода производилась автоэмиссионным током величиной порядка 8 мА. В ходе обезгаживания анода наблюдалось свечение. Интенсивность свечения зависела от напряженности электрического поля и величины полевого тока. В конце процесса обезгаживания, с помощью электронного пучка мощностью более 15 Вт, осуществлялся нагрев анода в течение 30 мин., а максимальный автоэмиссионный ток составлял 12 мА.

На Рисунке 4.6 приведены осциллограммы нестабилизированного выходного напряжения источника питания и падения напряжения на измерительном резисторе, которое пересчитывалось в эмиссионный ток. Падение напряжения, как видно на рисунке, которое характеризует полевой ток, согласно закона Фаулера – Нордгейма, оказалось крайне чувствительным к изменению напряжения источника питания. На Рисунке 4.7 приведены изменения тока эмиссии и напряжения источника питания с нестабилизированным выходным напряжением на протяжении восьми циклов испытаний с общей продолжительностью более 13,5 часов. В эту длительность время отключения источника питания и средств откачки не включалось. Из приведенного графика видно, что при средней плотности тока $1,3\cdot 10^3$ А/см², полученной при напряженности электрического поля около 50 В/мкм, изменения вакуумных условий, выразившиеся в отключении напряжения, дают изменения тока в пределах 6-8 мА.

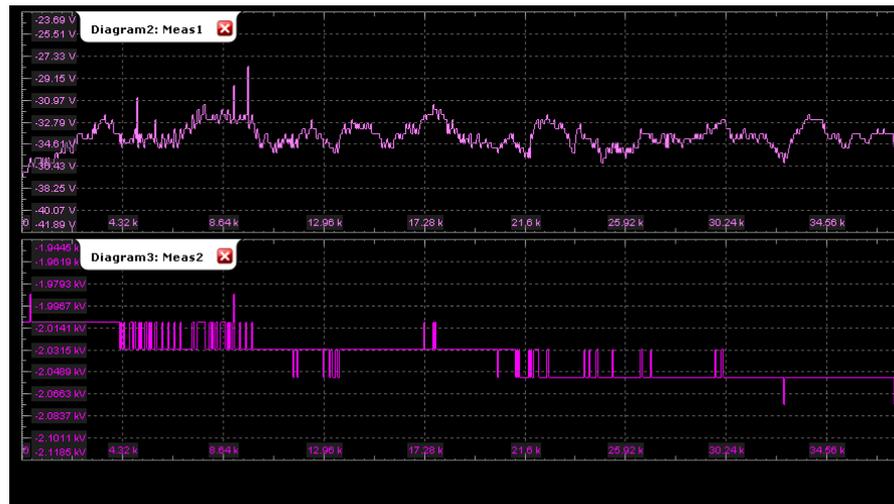


Рисунок 4.6. Осциллограммы одного из циклов испытаний: верхняя осциллограмма – падение напряжения на измерительном резисторе, нижняя – выходное напряжение нестабилизированного источника питания

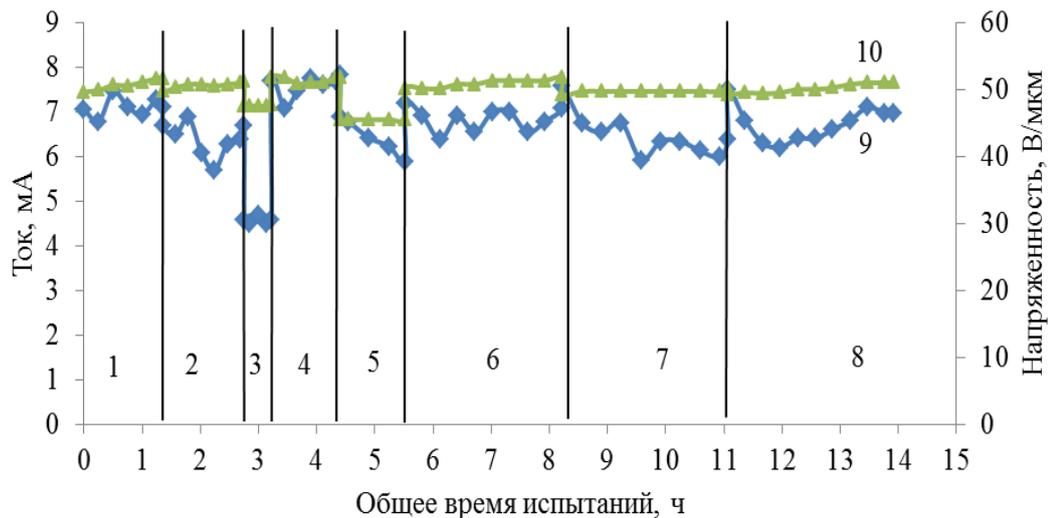


Рисунок 4.7. Флуктуации автоэмиссионного тока (9) и напряженности электрического поля (10) автоэмиссионного катода с 1 по 8 цикл долговременных испытаний

Вольт-амперные характеристики алмазграфитовых катодов, приведенные на Рисунке 4.8, были получены в ходе испытаний, состоявших из 8 циклов с общей длительностью 13,5 часов. Можно видеть, что сильноточная полевая эмиссионная способность алмазграфитового АЭК за время испытаний имела хорошую воспроизводимость. О хорошей воспроизводимости эмиссионных

свойств говорят ВАХ, построенные в координатах Фаулера – Нордгейма. Эти зависимости имеют линейный вид для режимов с заданной плотностью тока до испытаний в нестационарных температурно-вакуумных условиях с отключением питающего напряжения, а также после них.

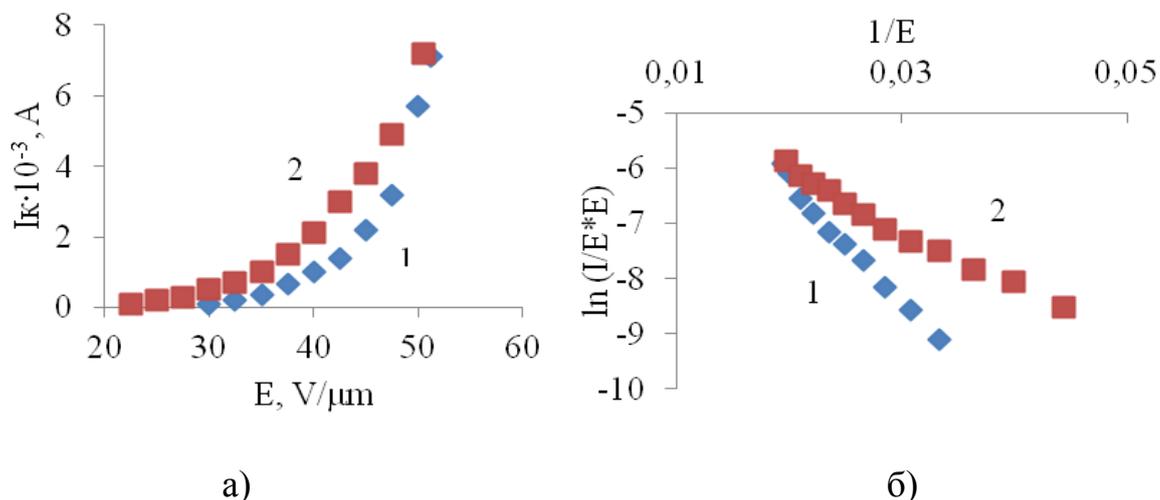


Рисунок 4.8. ВАХ алмазграфитового АЭЖ в линейных (а) и в координатах Фаулера-Нордгейма (б), полученные до (1) и после 8 циклов испытаний (2) в нестационарных температурно-вакуумных условиях

4.3 Восстановление эмиссионной способности алмазграфитовых АЭЖ после долговременной эксплуатации со сверхвысокими плотностями полевых токов

Проведены исследования причин возможных возникновений нестабильности полевой эмиссии и отказов алмазграфитовых АЭЖ при экстремально высоких плотностях полевых токов. Испытания заключались в поэтапном повышении напряженности электрического поля между катодом и анодом до появления неустойчивости эмиссии. При возрастании тока эмиссии катода, увеличивалась мощность, выделяющаяся на аноде, которая вызывала повышение температуры последнего. Разогрев анода приводил за счёт теплопередачи к разогреву других частей макета. Для откачки газов,

выделяющихся из разогретых частей макета, на каждом этапе подъёма напряжения проводилась выдержка. При высоких напряженностях поля процесс разогрева анода сопровождался свечением его поверхности. Так как анод был изготовлен из молибдена, при свечении его температура могла превышать 600 °С, что является верхним допустимым пределом при обезгаживании приборов и их узлов, не считая катодного. Плотность автоэмиссионного тока при этом составляла около $2,1 \cdot 10^3$ А/см². Однако такая плотность тока сохранялась непродолжительное время, затем она медленно снижалась и стабилизировалась на уровне $1,2 \cdot 10^3$ А/см².

Для исследования причин падения тока повышение напряженности поля прекращено и замерена текущая ВАХ катода. Визуальный осмотр поверхностей электродов после извлечения макета из рабочей камеры выявил изменения, которые могли указывать на причину снижения тока эмиссии. Установлено, что торцевая часть и прилегающая к ней поверхность углеродной пленки приобрели участок протяжённой формы, на котором покрытие отсутствовало (Рисунок 4.9). Длина распылённого ионной бомбардировкой участка лезвийного катода была близка к размеру анода, а в проекции торца катода на аноде наблюдалась область, покрытая темной пленкой. Измерение распылённой области АЭК с использованием измерительного микроскопа Hawk показало, что ее глубина составила 0,42 мм, протяженность области вдоль торца пленки 6,5 мм (Рисунок 4.10).

В ходе проведения элементного анализа поверхности анода была обнаружена углеродная компонента. Для определения ее свойств АЭК снова установили в вакуумную камеру, а затем провели очередной цикл испытаний, который повторил ранее полученную автоэмиссионную ВАХ. После этого на анод было подано отрицательное относительно АЭК напряжение, при котором в цепи фиксировался ток, близкий по величине к ранее полученным токам эмиссии с катода, но анодный ток не был устойчивым.

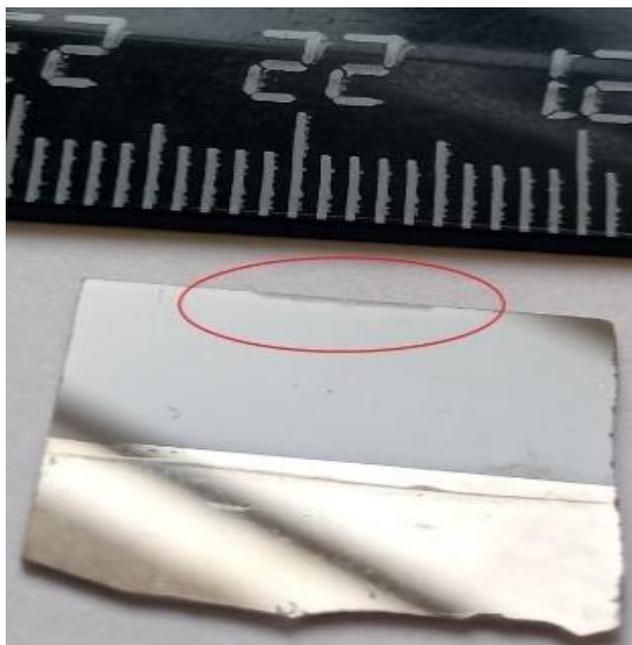
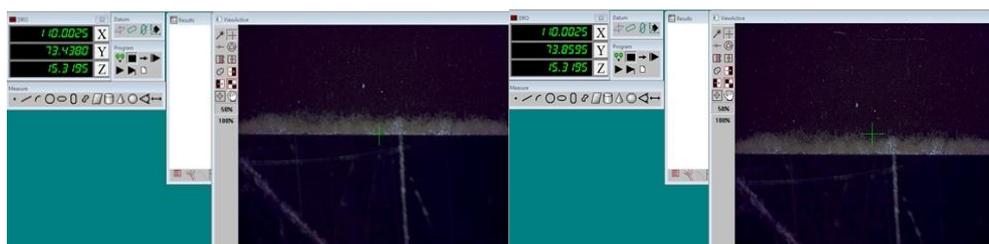
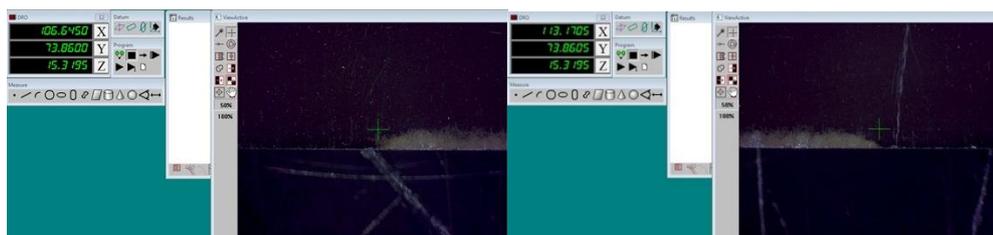


Рисунок 4.9. Внешний вид участка лезвийного АЭК после эксплуатации в экстремальных режимах



а)



б)

Рисунок 4.10. Области распыления торцевой части лезвийного автокатода: а) глубина, б) длина

Электрические микропробои, следствием которых было снижение автоэмиссионного тока, происходили при напряженностях электрического поля более 40 В/мкм (Рисунок 4.11). До их возникновения на ВАХ в координатах

Фаулера – Нордгейма фиксировался линейный участок, который свидетельствует о полевой природе тока с анода (Рисунок 4.11 б).

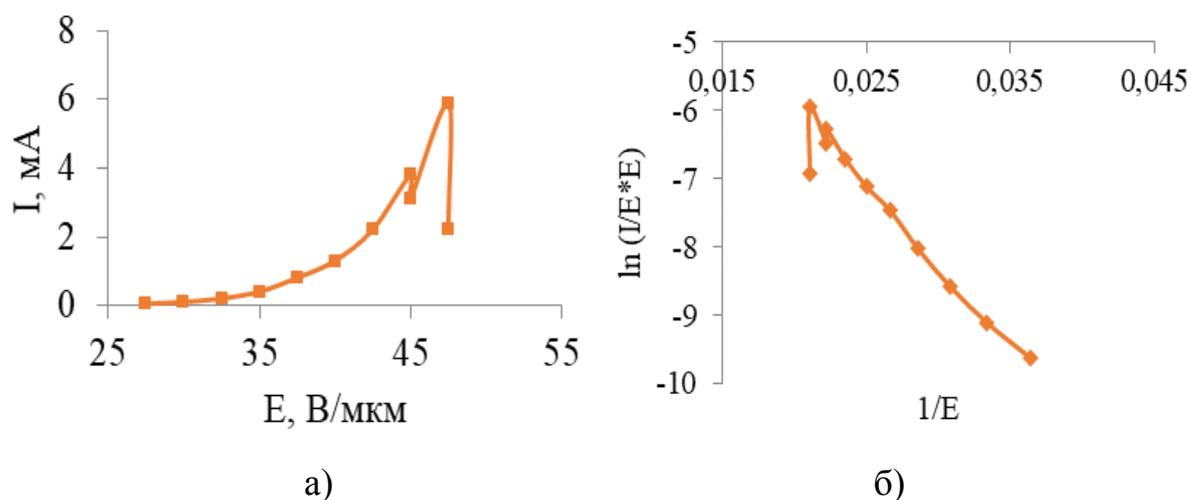


Рисунок 4.11. ВАХ полевой эмиссии с анода после проведения долговременных испытаний АЭК при экстремально высоких напряженностях электрических полей в линейных (а) и координатах Фаулера – Нордгейма (б)

После прекращения эмиссии с анода вновь осуществлялось прямое включение диодной структуры. В ходе измерения вольт-амперных характеристик было выявлено улучшение эмиссионной способности катода, которое проявлялось в снижении порога начала эмиссии и увеличении крутизны вольт-амперных характеристик, а это уже давало возможность получать те же самые токи, но при меньших величинах напряженностях электрического поля (Рисунок 4.12).

Подобная трансформация автоэмиссионной ВАХ, как показывает анализ, может быть следствием уменьшения поверхностного сопротивления, обусловленного улучшением микроструктуры алмазографитовой пленки после осаждения на ее поверхности высокопроводящей sp^2 углеродной фазы.

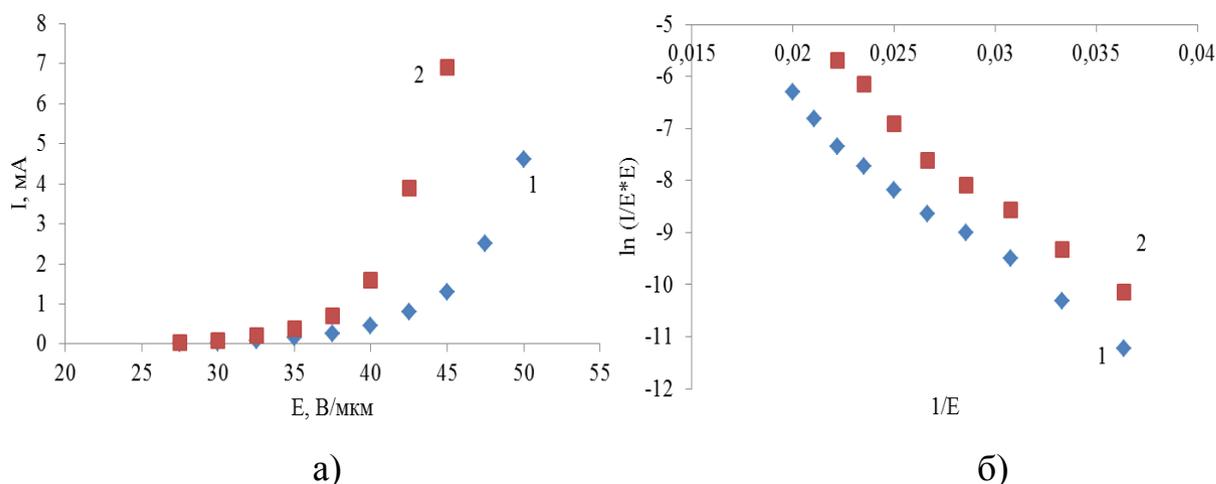


Рисунок 4.12. ВАХ АЭК в линейных (а) и в координатах Фаулера – Нордгейма (б) до (1) и после (2) переосаждения углеродной фазы с анода на катод

4.4 Выводы к главе 4

1. Исследования долговременной воспроизводимости и стабильности эмиссионных характеристик сильноточных полевых источников электронов на основе композитных углеродных пленочных покрытий с плотностью автоэмиссионного тока более 100 А/см^2 в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации показали, что их преимуществом перед МПК является высокая устойчивость автоэмиссионных характеристик в более широком интервале изменений давления в приборе, что повышает эксплуатационные свойства вакуумных приборов на их основе, не снабженных дополнительными средствами вакуумной откачки. Достоинством МПК перед АЭК является более высокая восстановительная эмиссионная способность после откачки прибора до исходного высокого вакуума.

2. Долговременная эксплуатация сильноточных алмазграфитовых АЭК в нестационарных температурно-вакуумных условиях, включая экстремальные режимы полевой эмиссии с образованием светящихся катодных факелов и распылением материала автокатода при плотности эмиссионного тока более 1000 А/см^2 , не нарушает полевой механизм эмиссии электронов. Значительный вклад в

характер вольт-амперной характеристики автоэмиссионного катода, даже, несмотря на катодное свечение и выделение джоулева тепла, термоэлектронная эмиссия не вносит.

3. Изменение состава атмосферы остаточной среды ЭВП на основе алмазографитовых АЭК приводит к изменению характеристик автоэмиссионных ВАХ, но не изменяет туннельный механизм эмиссии электронов. Эксплуатация алмазографитовых АЭК в остаточной среде с повышенным парциальным давлением азота увеличивает пороги начала полевой эмиссии и ухудшает крутизну ВАХ. Актуальным представляется исследование работоспособности алмазографитовых АЭК при неблагоприятных вакуумных условиях в течение длительного времени при натекании других газовых сред.

4. Впервые установлен эффект переосаждения углеродного материала с анода при изменении полярности приложенного напряжения обратно на автоэмиссионный катод, что приводит к восстановлению его эмиссионной способности. Эффект восстановления эмиссионной способности может быть применен для разработки автоэмиссионных катодов, работающих в критических условиях.

5. Алмазографитовые тонкопленочные композиты демонстрируют высокую степень воспроизводимости автоэмиссионных характеристик, на основании чего возможно предсказание долговременности работы полевых катодов различной конструкции, созданных на их основе, и функционирующих в назначаемых режимах тока, а также в нестабильных вакуумно-температурных условиях.

Глава 5 Разработка технологии получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий КСУ мощных ЭВП с МПК

5.1 Получение и исследование антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий

В качестве низкоэмиссионных покрытий использовались графитоподобные углеродные пленки (кривая 3 на Рисунке 2.2), которые получали осаждением в микроволновой плазме паров этанола низкого давления (Рисунок 5.1). Отработка технологии производилась на поликоровых подложках при давлении паров этанола $(1-2) \cdot 10^{-2}$ Па, напряжении смещения на подложкодержателе в процессе плазмохимического осаждения -300 В и температуре $300 \pm 10^\circ\text{C}$. Углеродные пленки имели на рентгенограммах доминирующий пик с межплоскостным расстоянием $d = 3,36 \text{ \AA}$, который соответствует отражению от грани (002) кристаллической фазы графита. Пленки имели более высокий потенциал работы выхода электронов, по сравнению с алмазоподобными углеродными пленками, осажденными в других режимах микроволновой плазмы паров этанола. Синтезируемые пленочные покрытия подвергались воздействию фторуглеродной плазмы, обработка производилась при давлении 0,1 Па и смещениях на подложкодержателе в интервале от 100 до 300 В в течение 5 минут. Измерения вторичной электронной эмиссии наноуглеродных покрытий до и после их обработки в плазме CF_4 осуществлялись по изменению яркости изображений в сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-7600F по методике, изложенной в [113]. Измерение яркости полученных изображений осуществлялось при энергии первичного пучка 1 кэВ и напряжении на сетке детектора вторичных электронов СЭМ равном 50 В. Такие энергии первичного пучка и напряжения на сетке детектора вторичных электронов являются наиболее успешными для детектирования истинно вторичных электронов. Установлено, что при обработке во фторсодержащей микроволновой плазме при смещениях в

диапазоне от 200 до 300 В вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ), по сравнению с необработанными углеродными покрытиями, уменьшается более, чем в два раза (Рисунок 5.2).

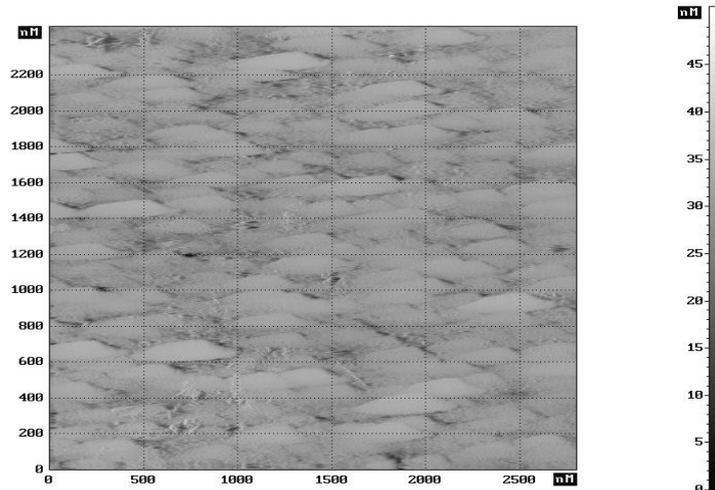


Рисунок 5.1. Изображение в сканирующем туннельном микроскопе поверхности науглеродной sp^2 пленки со «слоевым» ростом и «нормальным» потенциалом работы выхода электронов

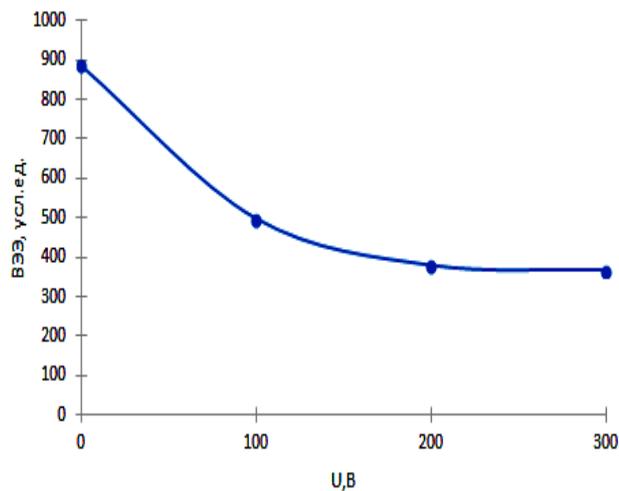


Рисунок 5.2. Зависимость ВЭЭ углеродной пленочной структуры от потенциала смещения на подложкодержателе при микроволновой плазменной обработке во фторуглеродной плазме (при $U=0$ В ВЭЭ соответствует углеродной пленке до плазменного фторирования)

Расчет работы выхода электронов после плазмохимической модификации углеродных структур в CF_4 производился по формуле, полученной с использованием выражения (2.3) и построения автоэмиссионных ВАХ до и после обработки во фторуглеродной плазме в координатах Фаулера и Нордгейма [68]:

$$\varphi_2 = \varphi_1 (K_2 * \text{tg}\alpha_2 / K_1 * \text{tg}\alpha_1)^{\frac{2}{3}}, \quad (5.1)$$

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 электрического поля на остриях поверхностей углеродных пленок, осажденных на поликоровые подложки, осуществлялась с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе P4-SPM-MDT производства NT-MDT. В качестве зонда использовались кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0.1 Н/м. Расчет высот и радиусов закругления острий пленочных структур производился с использованием функции Threshold программного обеспечения Image Analysis АСМ. Расчет производился относительно сечения морфологического скана, при котором фиксировались высоты острий с максимальной поверхностной плотностью.

На Рисунках 5.3, 5.4 приведены АСМ изображения морфологий и распределений поверхностных плотностей высот выступов-острий углеродной пленочной структуры с удельным поверхностным сопротивлением $90 \text{ кОм}/\square$ до и после обработки в плазме CF_4 . На исходных пленочных покрытиях наблюдалась максимальная концентрация нановыступов с высотами порядка 18 нм, при этом диаметр вершины острия составлял 2-4 нм. После модификации пленочных покрытий во фторуглеродной плазме было замечено увеличение высот

микровыступов до 23 нм, а также произошло уменьшение диаметра вершин до 1-2 нм (Рисунок 5.3). По полученным высотам и радиусам вершин были рассчитаны коэффициенты усиления острий до и после обработки в плазме хладона. Так до обработки коэффициент усиления составил 10-20, а после 25-50. На основании вышеопределенных коэффициентов K и вольт-амперных характеристик, построенных в координатах Фаулера – Нордгейма (Рисунок 5.5), определялась работа выхода.

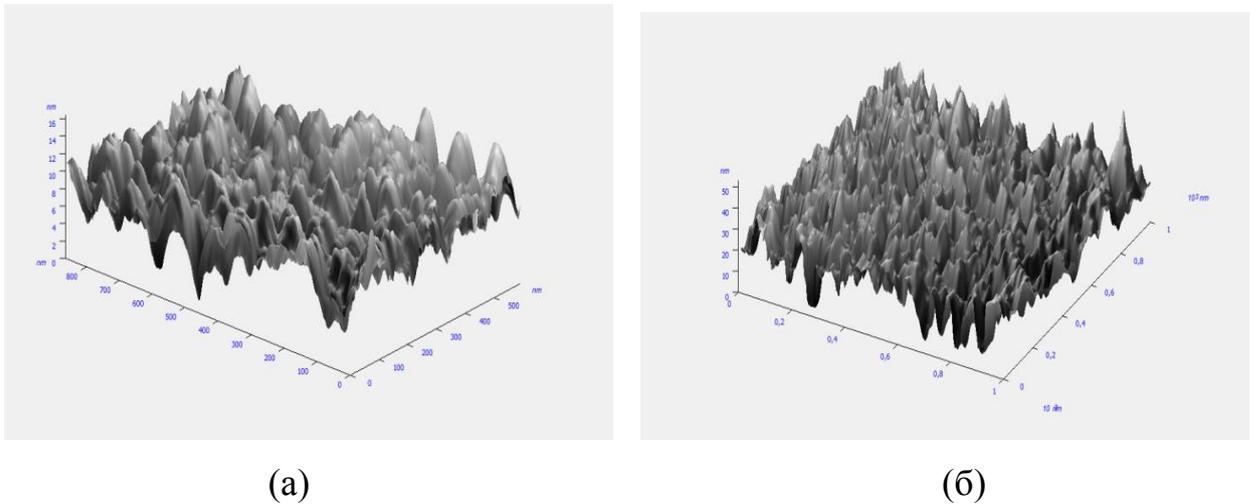


Рисунок 5.3. Атомно-силовая микроскопия тонкопленочных углеродных структур до (а) и после (б) плазмохимической обработки в плазме хладона (CF_4)

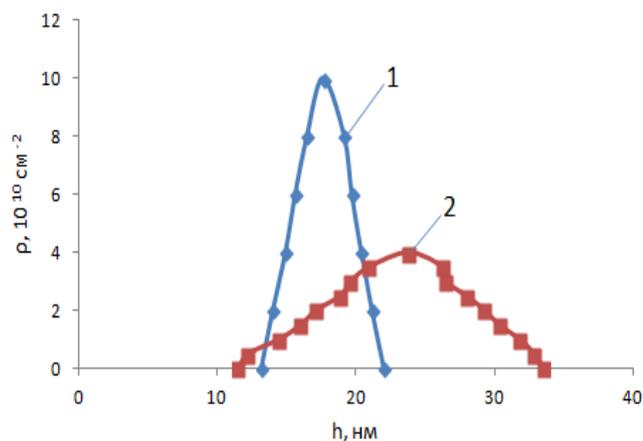


Рисунок 5.4. Поверхностные плотности высот выступов углеродной пленки до (1) и после (2) обработки в плазме CF_4

Подставив полученные значения коэффициента усиления в формулу 5.1 было получено, что после обработки углеродных пленочных покрытий в фторуглеродной плазме было замечено существенное увеличение работы выхода, а именно работа выхода возрасла до 5,2 эВ, что на 0,6 эВ больше, чем у углеродных пленочных покрытий до обработки.

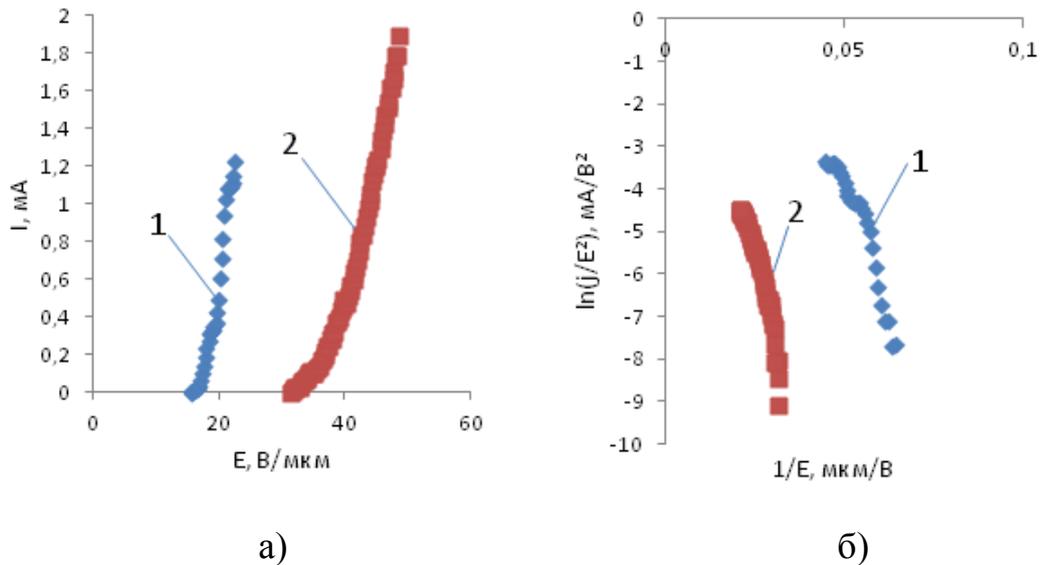


Рисунок 5.5. ВАХ углеродной пленочной структуры с удельным поверхностным сопротивлением 90 кОм/□ в линейных (а) и Фаулера – Нордгейма (б) координатах до (1) и после (2) обработки в плазме CF_4

5.2 Разработка методики измерения термоэмиссии управляющей сетки КСУ МПК мощных ЭВП

Исследования электронной термоэмиссии в КСУ МПК ЭВП СВЧ проводились с двумя сетками - управляющей и теневой, на каждую из которых осаждались углеродные пленки толщиной 0,2-0,3 мкм с последующим микроволновым плазменным фторированием их поверхностей с использованием в качестве рабочего газа CF_4 . Параллельно проводились испытания КСУ аналогичной типовой конструкции без углеродного покрытия на сетках.

КСУ с углеродным покрытием и без него устанавливались в идентичные вакуумные оболочки, которые откачивались до давления $3 \cdot 10^{-5}$ Па. Процедура обезгаживания включала нагрев оболочек с установленными КСУ под печью, разогрев МПК пропусканием тока через подогреватель, обезгаживание сеток путём токоотбора с катода. В процессе испытаний сохранялся вакуум на уровне $\sim 6 \cdot 10^{-5}$ Па.

Перед проведением экспериментов по исследованию термоэмиссии сеток, проводилось пирометрирование МПК с использованием пирометра с исчезающей нитью накала, который позволял проводить замеры яркостной температуры от 700 до 2000 °С. В результате пирометрирования были определены зависимости температуры катода (T_k) от напряжения накала (U_n) подогревателя (Рисунок 5.6). Полученные зависимости позволили определить технологические ограничения в проведении испытаний вплоть до самых высоких допустимых температур, которые для МПК составляют около 1200 °С.

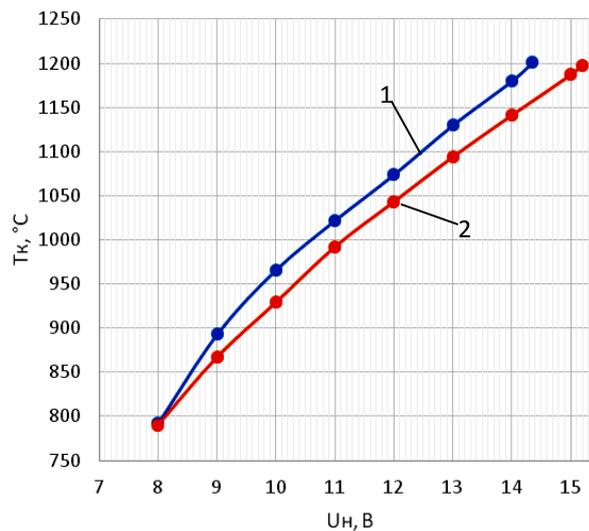


Рисунок 5.6. Зависимость T_k (U_n) для МПК в КСУ с углеродным покрытием на сетке (1), и типовом узле (2)

Первый этап экспериментального исследования управляющих сеток заключался в определении порога её разогрева, при котором появлялась термоэмиссия. Разогрев сетки в работающем приборе осуществляется излучением

с разогретого до температур ~ 1000 °С МПК, а также в результате токоотбора при бомбардировке её поверхности первичным пучком электронов. Электрическая мощность, выделяющаяся на управляющей сетке, рассчитывалась исходя из напряжения между катодом и управляющей сеткой и величины тока эмиссии МПК:

$$N = U \cdot I, \quad (5.2)$$

где U – переменное напряжение между катодом и сеткой, В; I – средний ток, протекающий в электрической цепи между электродами, в направлении от катода к сетке, А; N – мощность, выделяющаяся на сетке, Вт. Электрическая мощность, рассчитанная по формуле (5.2) находится в прямо пропорциональной зависимости от температуры сетки.

Принципиальная электрическая схема устройства для измерения токов сетки, приведена на Рисунке 5.7. Она включает МПК (1), управляющую сетку (2), собранные в единый КСУ, и заключенный в вакуумную оболочку, высоковольтный источник питания переменного тока (3), в цепь которого встраивались измерители токов, протекающих как с катода на сетку, так и с сетки на катод. Токи разделялись с помощью диодов. При разогретом катоде, после подачи переменного напряжения между катодом и сеткой, когда полярность на сетке была положительной относительно катода, происходил процесс термоэмиссии с катода на сетку. Величина тока фиксировалась одним из измерителей тока (5), через другой (4) протеканию тока препятствовал диод, включенный в цепь в обратном направлении. При изменении полярности на сетке происходил процесс термоэмиссии с сетки на катод. Термоэмиссия сетки присутствовала вследствие её разогрева отбором тока с катода в предыдущий момент времени, когда на ней был положительный потенциал относительно катода. Ток термоэмиссии сетки фиксировался измерителем тока (4), через измеритель (5) течение носителей заряда прерывалось соответствующим диодом. В качестве измерителей использовались стрелочные приборы для измерения

постоянного тока. Таким образом, фиксированные ими показания были усреднёнными по времени.

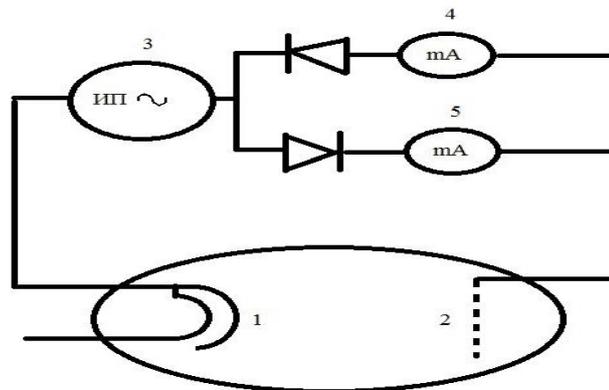


Рисунок 5.7. Электрическая схема для измерения токов сетки в двух направлениях

В экспериментах осуществлялось повышение мощности, выделяющейся на сетке при горячем катоде до величины, при которой происходит её разогрев до температур, при которых появляется эмиссия электронов с её поверхности вследствие конденсации слоя из атомов, термически испарённых МПК. Одновременно с термоэмиссией за счет высокой температуры сетки происходит термическое распыление с нее конденсата. Испарение продуктов работы катода с поверхностей сетки выражается в уменьшении тока термоэмиссии. При периодическом определении количества напылённого материала на сетку по её эмиссионной способности следует не превышать предельного значения мощности. В противном случае каждый замер термоэмиссии сетки будет приводить к её частичной или полной очистке от напылённых продуктов. Для определения порогового значения мощности, после которой начиналось испарение осажденных на сетках продуктов работы МПК для каждого из КСУ, участвовавших в эксперименте, проводились исследования зависимостей токов термоэмиссии от мощности, выделяющейся на сетках (Рисунок 5.8). Можно видеть, что ток термоэмиссии сетки без углеродного покрытия в 2-2,5 раза больше, чем ток сетки с антиэмиссионным углеродным покрытием. Он достигает величины, близкой к току термоэмиссии МПК. В проводимом эксперименте это

обусловлено высокой температурой управляющей сетки, на поверхности которой находилось некоторое количество осажденного активного вещества с МПК, снижающего работу выхода электронов. При достижении максимальной мощности на сетке её яркостная температура значительно превышала температуру катода испытываемого узла. После повышения температуры сетки путём повышения электрической мощности, выделяющейся на ней, происходило заметное снижение тока термоэмиссии. Максимальный ток сетки без углеродного покрытия достигался при мощности около 3,5 Вт. При дальнейшем повышении мощности и температуры сетки ток термоэмиссии быстро уменьшался, что обусловлено удалением с её поверхности материала, который испарялся с МПК.

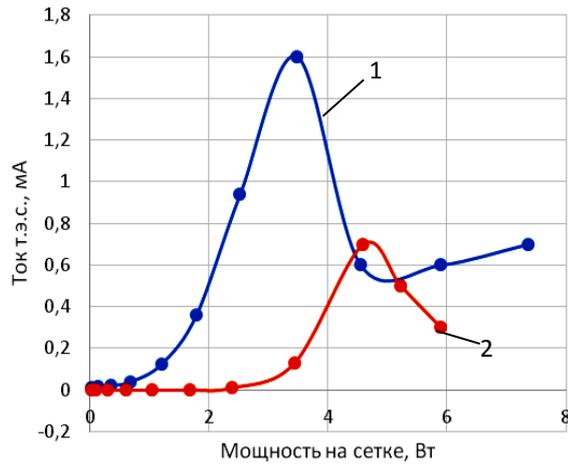


Рисунок 5.8. Зависимости токов термоэмиссии управляющей сетки для КСУ без углеродного покрытия (1) и для КСУ с углеродным покрытием (2)

После определения максимально допустимого значения мощности, с помощью U_n задавалась оптимальная T_k яркостная, равная 950 °С. Данная температура обеспечивала необходимый прогрев МПК для получения эмиссии, и вместе с тем ограничивала постоянную составляющую скорости испарения активного вещества МПК. После прогрева катода при данной температуре проводилось ступенчатое с интервалом 10 В повышение переменного напряжения в промежутке катод-сетка. При увеличении напряжения контролировалась мощность, выделяющаяся на управляющей сетке и ее ток эмиссии.

Температурный режим работы МПК, при котором проводились испытания, определялся по току эмиссии сетки. Если во время выдержки при определённой температуре МПК не происходило заметного возрастания тока термоэмиссии управляющей сетки, ее величина увеличивалась. В случае, когда после выдержки при разогретом катоде отмечался рост эмиссионного тока сетки, его температура фиксировалась для исследования развития термоэмиссии сетки. Полный перечень испытательных режимов для КСУ типовой конструкции приведен в Таблице 5.1. Испытательные режимы для КСУ с углеродным покрытием на сетках отличались от представленных в Таблице 5.1 более продолжительными выдержками при температуре катода 1200 °С.

Таблица 5.1. Режимы испытания КСУ типовой конструкции на долговременные включения МПК при различных температурных режимах

№ п/п	Испытательный режим: испытания, час./ температура МПК, °С	длительность
1	0 ч.	
2	1 ч. / 950	
3	2 ч. / 950	
4	2 ч. 50 мин. / 950	
5	4 ч. 10 мин. / 950	
6	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050	
7	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 45 мин. / 1150	
8	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150	
9	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 30 мин. / 1200	
10	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 2 ч. 30 мин. / 1200	

11	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 3 ч. 50 мин. / 1200
12	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 4 ч. 50 мин. / 1200
13	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 6 ч. 20 мин. / 1200
14	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 7 ч. 20 мин. / 1200
15	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 9 ч. 35 мин. / 1200
16	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 12 ч. 15 мин. / 1200
17	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 13 ч. 45 мин. / 1200
18	4 ч. 10 мин. / 950 + 2 ч. / 1050 + 2 ч. 45 мин. / 1150 + 15 ч. 15 мин. / 1200

5.3 Термоэмиссия управляющей сетки с фторированным углеродным покрытием

Стандартная длительность работы МПК в ЭВП при рабочей температуре ~1050 °С составляет 1000 часов. Поэтому представляло интерес исследование развития тока термоэмиссии управляющей сетки в этот временной промежуток.

На Рисунке 5.9 приведены зависимости токов термоэмиссии управляющих сеток от напряжения между электродами для КСУ без антиэмиссионного покрытия и в его присутствии. Можно видеть, что в случае типовой конструкции КСУ, при температурах катода до 1200 °С не происходит заметного повышения уровня термоэмиссии сетки. При проведении испытаний с заданием температуры катода на уровне 1200 °С за испытательные периоды, величина которых показана

в Таблице 5.1, на сетку напылялось столько материала, что появлялся заметный ток эмиссии сетки.

Для КСУ с графитоподобной углеродной плёнкой наблюдалась иная картина (Рисунок 5.9 б). Ток эмиссии сетки отсутствовал до температуры 1200 °С и при начальном этапе проведения испытания катода при температуре 1200 °С. Заметный ток термоэмиссии появился только после работы МПК при температуре 1200 °С в течение 4 ч. 50 мин.

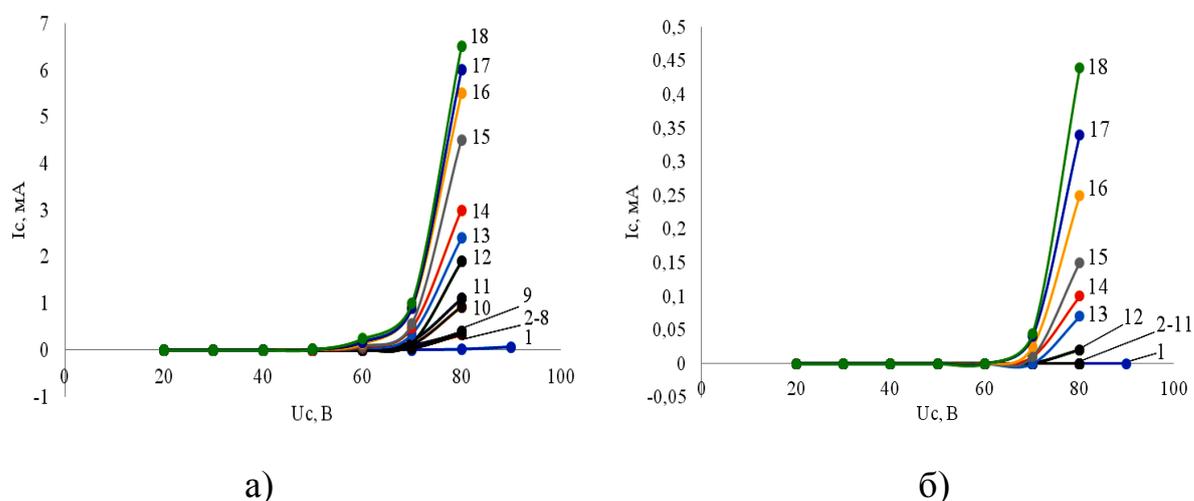


Рисунок 5.9. Изменения эмиссионной способности управляющих сеток при работе МПК в типовом КСУ (а) и КСУ с антиэмиссионным углеродным покрытием (б). 1-18 – токовые характеристики, полученные после испытательных режимов

Таким образом, сетка с фторированным углеродным покрытием начинает проявлять эмиссионные свойства при значительно больших температурах и с существенно меньшей интенсивностью. Заметным ток сетки становится при напряжениях свыше 60 В, т.е. при мощности свыше 1,8 Вт. Из Рисунка 5.10 можно видеть, что зависимости токов эмиссии управляющих сеток от длительности работы МПК при фиксированных напряжениях катод-сетка, имеют практически линейную взаимосвязь. В связи с этим, можно сделать вывод, что испарение материала МПК в рассмотренных промежутках времени происходит примерно с одинаковой скоростью и результаты по развитию токов сеток

адекватно характеризуют процессы, происходящие на их поверхностях в отсутствие углеродного покрытия и при его наличии.

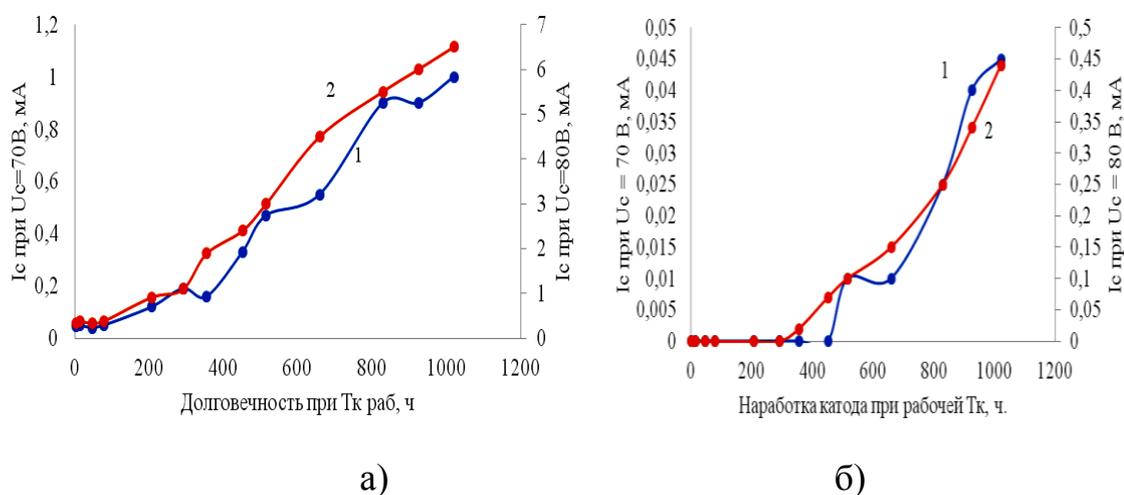


Рисунок 5.10. Зависимости токов эмиссии сетки от длительности работы МПК при 70 (1) и 80 В (2) в КСУ без углеродного покрытия (а) и при его наличии (б)

На Рисунке 5.11 приведены зависимости токов эмиссии сеток исследуемых КСУ при одинаковой мощности, выделенной на управляющей сетке, от длительности испытаний, которая для сеток типовой конструкции, изготовленных из гафния с работой выхода электронов 3,53 эВ, составляла 1000 часов, а для сеток с осажденным углеродным покрытием более 2000 часов. В конце испытаний эмиссионный ток сетки с углеродным покрытием был более, чем в три раза меньше, по сравнению с током сетки типовой конструкции КСУ, полученным при меньшей в два раза длительности испытаний. При одинаковой длительности испытаний, соответствующей стандартной долговечности МПК, различие в эмиссионных токах превышало один порядок. Из Рисунка 5.11 можно видеть, что зависимость тока эмиссии сеток с углеродным покрытием, в отличие от сеток из гафния типовой конструкции КСУ без покрытия с практически линейным увеличением эмиссионного тока от длительности испытаний, имеет немонотонный характер при существенно большей длительности начального участка с нулевым эмиссионным током. Это свидетельствует о том, что

углеродное покрытие, кроме уменьшения эмиссии, замедляет образование устойчивых соединений из веществ, термически испаренных катодом на поверхность управляющей сетки.

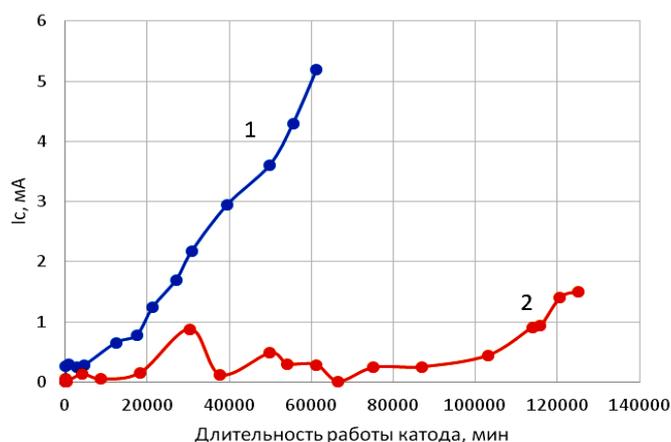
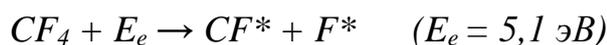
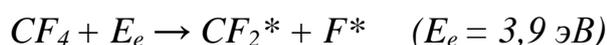
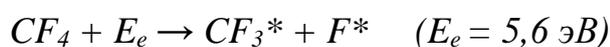


Рисунок 5.11. Зависимости токов эмиссии управляющих сеток от длительности испытаний: 1 – типовой КСУ; 2 – КСУ с углеродным покрытием

5.4 Физико-химические механизмы формирования антиэмиссионных свойств углеродных покрытий с плазменным фторированием поверхности

Исследованиями с использованием методов масс-спектрометрии и эмиссионной спектроскопии установлено, что в микроволновой плазме CF_4 в составе газовой плазмы фиксируются фрагменты молекул: радикалы фтора и CF_n , где $n = 0 \dots 3$, которые являются продуктами ступенчатой диссоциации CF_4 [84]:



Наряду с диссоциацией, не менее эффективными в условиях электронно-циклотронного резонанса оказываются процессы ионизации частиц газовой фазы. Из анализа значений энергии ионизации молекулы CF_4 и продуктов ее диссоциации, приведенных в Таблице 5.2, можно заключить, что наиболее

вероятным ионным составом газовой фазы являются положительные ионы CF_n^+ , где $n = 0...3$, а также, в связи с высокой электроотрицательностью фтора, его отрицательные ионы. При отрицательном потенциале на подложке на нее, преимущественно, могут поступать ионы CF_n^+ , где $n = 0...3$, а также нейтральные и активированные частицы фтора и CF_n , где $n = 0...4$.

Таблица 5.2. Энергия ионизации молекулы CF_4 и ее производных

Ион	CF_4^+	CF_3^+	CF_2^+	CF^+	F^+
Энергия ионизации, эВ	17,8	9,5	13,3	13,8	17,4

Известно, что вакуумно-плазменная обработка в среде CF_4 приводит не только к поверхностной активации углеродных пленок в ходе появления атомов с оборванными связями, но также имеет место возникновение точечных дефектов, среди которых наблюдаются атомы внедрения, повышающие свободную энергию, и инициирующие адсорбционные процессы, как химической, так и физической природы. Помимо этого, может возникать приповерхностная диффузия химически активных частиц. В силу того, что плазменный процесс обеспечивает поступление на подложку как ионизированных, так и нейтральных частиц, то будут иметь место два типа взаимодействия с поверхностью. Первый – химические реакции, входе которых образуются летучие соединения. Второй связан на физические процессы, а именно, на физическое распыление поверхности под действием ионной бомбардировки. Так в условиях СВЧ плазменного воздействия при уровне вакуума порядка 0,1 Па имеет место слабая заполненность поверхности адсорбированными атомами [87]. В этом случае наиболее вероятным является процесс, при котором ускоренный электрическим смещением молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора (ионно-индуцированная (ударная) диссоциация молекулярного иона):



При низких энергиях ионов, когда процессами физического распыления можно пренебречь, обработка углеродных покрытий во фторсодержащей плазме совершается формированием на поверхности CF_n связей, где $n = 0 \dots 3$:



где R - кристаллическая решетка углерода.

Хемосорбированные на углеродном покрытии комплексы $C = CF_n$, где $n = 1 \dots 3$, пассивируют оборванные в результате ионной бомбардировки химические связи поверхностных атомов углерода. Комплексы CF_n имеют сильные энергии химической связи (Таблица 5.3). Самой устойчивой к разрыву связью обладают комплексы CF , эта связь более чем в два раза превышает энергию разрыва химической связи между атомами углерода, которая составляет порядка 2,74 эВ.

Адкомплексы с большим коэффициентом n , имеющие более низкие энергии связей, за счет ионной бомбардировки и поверхностной диффузии с образованием более летучих соединений CF_3 и CF_4 могут быть десорбированы с поверхности с увеличением энергии ионов, которое регулируется приложенным смещением на подложкодержателе (Рисунок 5.2).

Таблица 5.3. Энергии разрыва химических связей адкомплексов CF_n

Химическая связь	CF	CF_2	CF_3
Энергии разрыва химических связей, эВ	5,6	5,1	4,0

Ввиду высокой электроотрицательности атомов фтора при пассивации оборванных углеродных связей увеличивается суммарный дипольный момент поверхности. Дипольная поляризация, вызванная атомами фтора, направлена от границы раздела в вакуум, что приводит к увеличению работы выхода электронов. С увеличением потенциала смещения при плазменной обработке увеличивается на поверхности углеродного покрытия доля вертикально ориентированных к поверхности CF комплексов, создавая при этом максимальный дипольный момент поверхности, при котором реализуется минимальная вторичная электронная эмиссия.

Микроволновое плазменное фторирование поверхности углеродных пленочных структур, одновременно с увеличением работы выхода электронов, уменьшает вероятность прилипания на управляющие сетки КСУ ЭВП термически испаренных атомов легирующих примесей МПК. Последнее обусловлено низкой поляризуемостью комплексов CF_n и, как следствие, низкими поверхностной энергией покрытия и диполь-дипольного взаимодействия Ван-дер-Ваальса при адсорбции [114]. Это уменьшает время жизни адатомов и скорость формирования новой фазы при термическом осаждении на подложке атомов инородных веществ. Благодаря этим факторам замедляются изменения термо- и вторичной электронной эмиссия углеродных покрытий КСУ, увеличивается КПД и долговечность ЭВП высокой мощности.

5.5 Выводы главы 5

1. С использованием микроволновой плазмы паров этанола низкого давления определены режимы получения графитовых пленок с более высоким потенциалом работы выхода электронов, по сравнению с алмазоподобными углеродными пленками, осажденными в других режимах микроволновой плазмы паров этанола;
2. Установлены оптимальные режимы обработки графитовых пленок в микроволновой плазме, где в качестве плазмообразующего используется фторсодержащий газ CF_4 , которые обеспечили получение низкоэмиссионных покрытий для управляющих сеток КСУ ЭВП СВЧ высокой мощности;
3. Предложена методика расчета работы выхода электронов низкоэмиссионных графитоподобных углеродных пленок, основывающаяся на построении автоэмиссионных ВАХ в координатах Фаулера – Нордгейма;
4. Исследованиями с использованием АСМ установлено, что в процессе плазменного фторирования углеродных пленок осуществляется их плазмохимическое травление, которое увеличивает коэффициенты усиления поля

на выступах-остриях их поверхности. Показано, что плазменное фторирование углеродных пленок увеличивает работу выхода электронов от исходных 4,6 эВ до 5,2 эВ после обработки в плазме CF_4 ;

5. Разработана методика измерения термоэмиссии управляющей сетки КСУ МПК мощных ЭВП СВЧ, которая позволяет определить ее эмиссионную способность в зависимости от температуры и эмиссионного тока МПК;

6. Установлено, что при одинаковой мощности, выделенной на управляющей сетке, эмиссионный ток сетки с углеродным покрытием более, чем в три раза меньше, по сравнению с током сетки типовой конструкции КСУ, полученным при стандартной, меньшей в два раза, длительности испытаний. При одинаковой длительности испытаний, соответствующей стандартной долговечности МПК, различие в эмиссионных токах превышает один порядок;

7. Установлено, что углеродное покрытие, кроме уменьшения эмиссии, замедляет образование устойчивых соединений из веществ, термически испаренных с МПК на поверхность управляющей сетки;

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

Основные выводы и результаты работы

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 алмазграфитовых 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. Показано, что максимальные автоэмиссионные токи в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности реализуются при оптимальных значениях поверхностных электропроводностей наноуглеродных структур.

3. Установлено, что взаимосвязь между пороговыми напряженностями полевой эмиссии электронов в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности и удельными поверхностными сопротивлениями алмазграфитовых композитов описывается законом Ома. Максимальные автоэмиссионные токи, характеризующие переход от режима устойчивой эмиссии к взрывной эмиссии, зависят от поверхностного сопротивления углеродных пленочных композитов. В низкоомных пленочных структурах основным механизмом разрушения катодных структур в экстремальных режимах эксплуатации 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 в катодных структурах, изготовленных на их основе. Наиболее устойчивыми к возникновению взрывной эмиссии являются катодные матрицы, которые имеют максимальные автоэмиссионные токи при небольшой крутизне ВАХ.

6. Тонкопленочные углеродные структуры, в зависимости от величины поверхностного сопротивления, имеют различающийся характер процессов, протекающих при их разрушении при экстремальной автоэлектронной эмиссии. Алмазографитовые нанокompозиты с низким сопротивлением, эксплуатируемые в критических режимах функционирования полевых планарно-торцевых эмиссионных структур, демонстрируют на катодной части пленки «сетку» пробоев электротеплового характера, вызванную протеканием по поверхности скользящего электрического разряда. Это явление можно считать ключевой причиной нестабильной автоэмиссии, и последующего разрушения катода. В высокоомных алмазографитовых пленочных структурах, также как для сильноточных торцевых автоэмиссионных структур, основным характером разрушения при экстремальных режимах эксплуатации является эрозия катодной части пленки. Взрывная эмиссия электронов, осуществляемая из центров эмиссии, сопровождается формированием факела катодной плазмы с последующим переносом графитовой составляющей углеродной пленки в межэлектродное пространство и на поверхность анода.

7. Исследования долговременной воспроизводимости и стабильности эмиссионных характеристик сильноточных полевых источников электронов на основе композитных углеродных пленочных покрытий с плотностью автоэмиссионного тока более 100 A/cm^2 в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации показали, что их преимуществом перед

металлопористыми термокатодами является высокая устойчивость автоэмиссионных характеристик в более широком интервале изменений давления в приборе, что повышает эксплуатационные свойства вакуумных приборов на их основе, не снабженных дополнительными средствами вакуумной откачки.

8. Впервые установлен эффект переосаждения углеродного материала с анода при изменении полярности приложенного напряжения обратно на автоэмиссионный катод, что приводит к восстановлению его эмиссионной способности. Обнаруженный эффект может быть использован для улучшения эмиссионных характеристик АЭК, а также для восстановления его эмиссионной способности при долговременной работе в составе ЭВП 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 ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов.

10. Показано, что плазменное фторирование низкоомных графитоподобных углеродных пленок увеличивает работу выхода электронов от исходных 4,6 эВ до 5,2 эВ после обработки в плазме CF_4 . При этом ток с управляющей сетки уменьшается более, чем в три раза, по сравнению с током сетки типовой конструкции КСУ, полученный при стандартной, меньшей в два раза, длительности испытаний. При одинаковой длительности испытаний, соответствующей стандартной долговечности МПК ЭВП СВЧ, различие в эмиссионных токах превышало один порядок.

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

Список литературы

1. Zhang, J. Progress in narrowband high-power microwave sources featured / J. Zhang, D. Zhanga, Y. Fan, J. He, X. Ge, X. Zhang, J. Ju, and T. Xun. // *Physics of Plasmas*. – 2020. – Vol. 27. – 010501.
2. Mittal, G. Recent progress in nanostructured next-generation field emission devices / G. Mittal, I. Lahiri // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 47. – 323001.
3. Фурсей, Г.Н. Автоэлектронная и взрывная эмиссия из графеноподобных структур / Г.Н. Фурсей, М.А. Поляков, А.А. Кантонистов, А.М. Яфясов, Б.С. Павлов, В.Б. Божевольнов // *ЖТФ*. – 2013. – Т. 83, Вып. 6. – С. 71–77.
4. Panda, K. Nanoscale investigation of enhanced electron field emission for silver ion implanted/post-annealed ultrananocrystalline diamond films / K. Panda, J.J. Hyeok, J.Y. Park, K.J. Sankaran, S. Balakrishnan, I.N. Lin // *Sci. Reports*. – 2017. – Vol. 7. – 16325.
5. Sobaszek, M. Diamond Phase (sp³-C) Rich Boron-Doped Carbon Nanowalls (sp²-C): Physicochemical and Electrochemical Properties / M. Sobaszek, K. Siuzdak, J. Ryl, M. Sawczak, S. Gupta, S.B. Carrizosa, M. Ficek, B. Dec, K. Darowicki, R. Bogdanowicz // *J. Phys. Chem.* – 2017. – Vol. 121, No 38. – 20821.
6. Яфаров, Р.К. Исследование возможности создания автоэмиссионного катода для безнакального магнетрона на основе алмазографитового нанокompозита / Р.К. Яфаров, П.Е. Новиков, В.П. Еремин, Д.О. Кочнев // *Вопросы электротехнологии*. – 2018. – Вып. 2. – С. 62–71.
7. Гуляев, Ю.В. Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур / Ю.В. Гуляев, Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, С.П. Морев, А.Ф. Резчиков, Н.И. Сеницын, А.Н. Якунин // *Письма в ЖТФ*. – 2013. – Т. 39, Вып. 11. – С. 63–70.
8. Яфаров, Р.К. Алмазографитовый нанокompозит для сильноточной полевой эмиссии электронов / Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин, Д.В. Нефедов // *Докл. VI Всерос. микроволновой конф.* – 2018. – С. 142.

9. Яфаров, Р.К. Углеродный пленочный наноккомпозит для сильноточных полевых источников электронов / Р.К. Яфаров, В.Я. Шаныгин, Д.В. Нефедов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2019. – Т. 19, Вып. 1. – С. 68–75.
10. Дюбуа, Б.Ч. Антиэмиссионные и антидинаatronные материалы / Б.Ч. Дюбуа, Л.А. Ермолаев // Вопросы радиоэлектроники. Серия 1 «Электроника». – 1964. – Вып. 12. – С. 170.
11. Бабанов, Ж.Н. К вопросу о подавлении термоэлектронной эмиссии с сеток электровакуумных приборов / Ж.Н. Бабанов, Б.И. Козлов, А.А. Андреев // Электронная техника. Серия 6 «Материалы». – 1980. – Вып. 8(320). – С. 14-17.
12. Han, J.-W. Vacuum nanoelectronics: Back to the future?—Gate insulated nanoscale vacuum channel transistor / J.-W. Han, J.S. Oh, M. Meeyappan // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 100. – 213505.
13. Marcus, R.B. Formation of silicon tips with < 1 nm radius / R.B. Marcus, T.S. Ravi, T. Gmitter // Appl. Phys. Lett. – 1990. – Vol. 56, No 3. – P. 236-238.
14. Guerrero, S. A. Silicon Field Emitter Arrays With Current Densities Exceeding 100 A/cm² at Gate Voltages Below 75 V / S. A. Guerrero, A. I. Akinwande // IEEE Electron Device Letters. 2016. - Vol. 37, No 1. – P. 96-99.
15. Герасименко, Н.Н. Кремний - материал нанoeлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю. Н. Пархоменко - М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
16. Успехи наноинженерии: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томсона. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.
17. Dantas, M. Silicon field-emission devices fabricated using the hydrogen implantation–porous silicon (HI–PS) micromachining technique / M. Dantas, E. Galeazzo, H. Peres, M. M. Kopelovski, F. J. Ramirez-Fernandez // Journal of microelectromechanical systems. – 2008. – P.1263-1269.
18. Patent 5.382.867 US, H01J 1/02. Field-emission type electronic device / Y. Maruo, Y. Akagi, T. Ise, M. Urayama. 01.1995.
19. Velásquez-García, L.F. Uniform High-Current Cathodes Using Massive Arrays of Si Field Emitters Individually Controlled by Vertical Si Ungated FETs—Part

1: Device Design and Simulation / L.F. Velásquez-García, S. Guerrero, Y. Niu, A.I. Akinwande // IEEE Tran. – 2011. – Vol. 58. - 1783.

20. Zhao, F. Structures and Field Emission Characteristics of Ion Irradiated Silicon Nanowire Arrays / F. Zhao, J.-H. Deng, D.-D. Zhao, K.-F. Chen, G.-A. Cheng, R.-T. Zheng // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2010. – V. 10. – P. 7634-7638.

21. Dimitrov, D.A. Modeling electron emission and surface effects from diamond cathodes / D.A. Dimitrov, D. Smithe, J.R. Cary, I. Ben-Zvi, T. Rao, J. Smedley, E. Wang // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol. 117. – 055708.

22. Yinhang, Z.K. A critical review of nanodiamond based nanocomposites: Synthesis, properties and applications / Z.K. Yinhang, Y.R. Kyong, H. David, P. Soo-Jin // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 19-27.

23. Terranova, M.L. Nanodiamonds for field emission: state of the art / M.L. Terranova, S. Orlanducci, M. Rossi, E. Tamburri // Nanoscale. – 2015. – Vol. 7. – 5094.

24. Архипов, А.В. Роль наночастиц в полевой эмиссии электронов из наноуглеродных материалов / А.В. Архипов, Н.М. Гнучев, С.И. Крель // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Физико-математические науки. – 2012. – Вып. 4. – С.98-103.

25. Zeng, B. Field emission of carbon nanotubes in NanoScience in Biomedicine / B. Zeng, Z. Ren. Springer, 2009). - pp. 588-617.

26. Wei, W. Fan Tip Cooling Effect and Failure Mechanism of Field-Emitting Carbon Nanotubes / W. Wei, Y. Liu, Y. Wei, K. Jiang, L.-M. Peng, S. Fan // Nano Lett. – 2006. – Vol. 7, No 1. – P.64-68.

27. Wei, L. Very High Field-Emission Current From a Carbon-Nanotube Cathode With a Pulse Driving Mode / L. Wei, Z. Xiaobing, L. Chaogang, Z. Zhiwei // Electron Device Letters, IEEE. – 2009. – Vol. 30, No 5. – P.571 – 573.

28. Nilsson, L. Scanning field emission from patterned carbon nanotube films / L. Nilsson, O. Groening, C. Emmenegger, O. Kuettel, E. Schallerand, L. Schlapbach // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 76, No 15. P. 2071-2073.

29. Пат. 2391738 Российская федерация, МПК H01J 9/02, B82B 3/00. Структура и способ изготовления полевых эмиссионных элементов с углеродными нанотрубками, используемыми в качестве катодов / Г.Я. Красников, Н.А. Зайцев, О.П. Гушин, С.Н. Орлов, Ю. М. Пастухова; заявитель и патентообладатель ОАО "НИИ молекулярной электроники и завод "Микрон", заявл. 11.02.08; опубл. 10.06.10.

30. Пат. 20110005191 US, МПК F03H 1/00, H01J 1/02. Cold cathodes and ion thrusters and methods of making and using same / W. Judson, L. R. Mitchell, 13.06.2011.

31. Патент US 2014270087 (A1), МПК H01J 35/06, от 18.09.2014 г.

32. Пат. 2586628 Российская федерация, МПК H01J 1/10 82B 3/00. Повышение крутизны ВАХ сильноточных полевых источников электронов / А.Р. Яфаров, Д.Н. Золотых, Р.К. Яфаров; заявитель и патентообладатель АО "НПП "Алмаз". - № RU 2 765 635 C1; заявл. 20.04.21; опубл. 01.02.22.

33. Пат. 2 656 150 C1 Российская федерация. Полевой эмиссионный элемент и способ его изготовления / С.Н. Козлов, А.В. Живихин, А.А. Павлов, А.Н. Сауров; опубл. 21.02.17.

34. Wei, W. Measuring the stress in field-emitting carbon nanotubes / W. Wei, J. Kaili, W. Yang, L. Ming, Y. Haitao, Z. Lina, L. Qunqing, L. Liang, F. Shoushan // Nanotechnology. – 2006. Vol. 17. No 8. – P. 1994-1998.

35. Шешин Е.П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов / Е.П. Шешин. – М.: Изд-во МФТИ, 2001. – 287 с.

36. Augus J.C. Low-pressure, metastable growth of diamond and "diamondlike" phases / J.C. Augus, C.C. Hayman // Science. – 1988. – No 241. – P. 913–921.

37. Yarbrough, W.A. Current Issues and Problems in the Chemical Vapor Deposition of Diamond / Yarbrough W.A., Messier R. // Science. – 1990. – Vol. 247, No 4943. – P. 688–696.

38. May, P.W. Diamond thin films: a 21st-century material / May P.W. // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2000. – Vol. 358. – P. 473–495.

39. Butler, J.E. The CVD of Nanodiamond Materials / J.E. Butler, A.V. Sumant // *Chem. Vapor. Depos.* – 2008. – Vol. 14, No 7-8. – P. 145–160.
40. Gray, K.J. Free-standing CVD diamond wafers for thermal management by d.c. arc jet technology / K.J. Gray, H. Windischmann // *Diam. Relat. Mater.* – 1999. – Vol. 8. – P. 903–908.
41. Bogdan, G. Thick single crystal CVD diamond prepared from CH₄-rich mixtures / G. Bogdan, K. De Corte, W. Deferme, K. Haenen, M. Nesládek // *Phys. Status Solidi. A.* 2006. – Vol. 203, No 12. – P. 3063–3069.
42. Liu, C. Growth of micro- and nanocrystalline dual layer composite diamond films by microwave plasma CVD: Influence of CO₂ concentration on growth of nano-layer / C. Liu, J.H. Wang, J. Weng // *J. Cryst. Growth.* – 2015. – Vol. 410. – P. 30–34.
43. Fernandes, A.J.S. Nano- and micro-crystalline diamond growth by MPCVD in extremely poor hydrogen uniform plasmas / A.J.S. Fernandes, M.A. Neto, F.A. Almeida, R.F. Silva, F.M. Costa // *Diam. Relat. Mater.* – 2007. – Vol. 16. – P. 757–761.
44. Yang, L. Novel Diamond Films Synthesis Strategy: Methanol and Argon Atmosphere by Microwave Plasma CVD Method Without Hydrogen / L. Yang, C. Jiang, S. Guo, L. Zhang, J. Gao, J. Peng, L. Hu, T. Wang // *Nanoscale Res. Lett.* – 2016. – Vol. 11. – 415.
45. Pal, K.S. Influence of growth conditions on microstructure and defects in diamond coatings grown by microwave plasma enhanced CVD / K.S. Pal, S. Bysakh, A.K. Mallik, N. Dandapat, S. Datta, B.K. Guha // *Bull. Mater. Sci.* – 2015. Vol. 38, No 3. – P. 717–724.
46. Vlasov, I. Hybrid Diamond-Graphite Nanowires Produced by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition / I. Vlasov, O.I. Lebedev, V.G. Ralchenko, E. Goovaerts, G. Bertoni, G. Van Tendeloo, V.I. Konov // *Adv. Mater.* – 2007. Vol. 19, No 22. – P. 4058–4062.

47. Arenal, R. Diamond nanowires and the insulator-metal transition in ultrananocrystalline diamond films / R. Arenal, P. Bruno, D.J. Miller, J. Lal, D.M. Gruen // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol. 75, No 19. – 195431.
48. Rakha, S.A. Diamond-graphite nanorods produced by microwave plasma chemical vapor deposition / S.A. Rakha, G. Yu, J. Cao, S. He, X. Zhou // *Diam. Relat. Mater.* – 2010. – Vol. 19, No 4. – P. 284–287.
49. Yamaguchi, H. Electron emission from conduction band of diamond with negative electron affinity / H. Yamaguchi, T. Masuzawa, S. Nozue, Y. Kudo, I. Saito, J. Koe, M. Kudo, T. Yamada, Y. Takakuwa, K. Okano // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80. – 165321.
50. Shang N. Self-Assembled Growth, Microstructure, and Field-Emission High-Performance of Ultrathin Diamond Nanorods / N. Shang, P. Papakonstantinou, P. Wang, A. Zakharov, U. Palnitkar, I.N. Lin, M. Chu, A. Stamboulis // *ACS Nano.* – 2009. – Vol. 3, No 4. – P. 1032–1038.
51. Kunuku, S. Microplasma device architectures with various diamond nanostructures / S. Kunuku, K.J. Sankaran, K.-C. Leou, I.N. Lin // *Mater. Res. Express.* – 2017. – Vol. 4, No 2. – 025001.
52. Sankaran, K.J. Enhancement of plasma illumination characteristics of few-layer graphene-diamond nanorods hybrid / K.J. Sankaran, C.J. Yeh, S. Drijkoningen, P. Pobedinskas, M.K. Van Bael, K.C. Leou, I.N. Lin, K. Haenen // *Nanotechnology.* – 2017. – Vol. 28. – 065701.
53. Ramaneti, R. Vertically aligned diamond-graphite hybrid nanorod arrays with superior field electron emission properties / R. Ramaneti, K.J. Sankaran, S. Korneychuk, C.J. Yeh, G. Degutis, K.C. Leou, J. Verbeeck, M.K. Van Bael, I.N. Lin, K. Haenen // *Apl. Mater.* – 2017. – Vol. 5. – 066102.
54. Wang, X.-P. Diamond film, single-layer carbon nanosheet film and diamond/carbon nanosheet composite film synthesis and field emission performance comparison / X.-P. Wang, L.-H. Liu, L.-J. Wang, // *J. Alloy Compd.* – 2017. – Vol. 727. – P. 185–190.

55. Xinyi, J. Growth behavior of CVD diamond films with enhanced electron field emission properties over a wide range of experimental parameters / J. Xinyi, H. Nan, G. Yuning, L. Lusheng, L. Peng, Z. Zhaofeng, Y. Bing, Y. Ziyao, S. Dan, J. Xin // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2018. – Vol. 34, No 12. P. 2398–2406.
56. Спицын, Б.В. Термохимия и термодинамика нанокристаллов алмаза / Б.В. Спицын, С.Н. Жевненко // *Сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технологии»*. – Троицк, 2016. – С. 429.
57. 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.
58. Блохинцев, Д. И. Основы квантовой механики / Д. И. Блохинцев. – М.: Наука, 1983. – 664 с.
59. Месяц, Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме / Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.
60. Давидович, М.В. Импульсные и статические автоэмиссионные ВАХ-углеродных нанокластерных структур: эксперимент и его интерпретация / М.В. Давидович, Р.К. Яфаров // *ЖТФ*. – 2019. - Т. 89, Вып. 8. – С. 1282-1293.
61. Лобанов, В.М. Периодические отклонения автоэмиссионного тока из углеродной нанотрубки от прямой Фаулера-Нордгейма / В.М. Лобанов, Е.П. Шешин // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Т. 33, Вып. 9. – С. 11-17.
62. Эйдельман, Е.Д. Полевая эмиссия из углеродных наноструктур: модели и эксперимент / Е.Д. Эйдельман, А.В. Архипов // *УФН*. – 2020. - Т. 190, Вып. 7. – С. 693-714.
63. Zhirnov, V.V. Field emission from silicon spikes with diamond coatings / V.V. Zhirnov, E.I. Givargizov, P.S. Plekhanov // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 1995. – Vol. 13, No 2. – P. 418– 421.
64. Carey, J.D. Role of nanostructure on electron field emission from amorphous carbon thin films / J.D. Carey, R.D. Forrest, C.H. Poa, S.R.P. Silva // *J. Vac. Sci. Technol. B*. – 2003. – Vol. 21, No 4. – P. 1633–1639.

65. Ilie, A. Effect of work function and surface microstructure on field emission of tetrahedral amorphous carbon / A. Ilie, A. Hart, A.J. Flewitt, J. Robertson, W.I. Milne // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88, No 10. – P. 6002–6010.

66. Kokkorakis, G.C. Local electric field and enhancement factor around nanographitic structures embedded in amorphous carbon / G.C. Kokkorakis, J.P. Xanthakis // *Surface and Interface Analysis*– 2007. – Vol. 39. – P. 135–138.

67. Obraztsov, A.N. A nano-graphite cold cathode for an energy-efficient cathodoluminescent light source / A.N. Obraztsov, V.I. Kleshch, E.A. Smolnikova // *Beilstein J. Nanotechnol.* – 2013. – Vol. 4. – P. 493–500.

68. Yamada, T. Field emission properties of nano-structured phosphorus-doped diamond / T. Yamada, C.E. Nebel, S. Shikata // *Appl. Surf. Sci.* – 2009. – Vol. 256 No 4. – P. 1006–1009.

69. Okotrub, A.V. Field emission from products of nanodiamond annealing / A.V. Okotrub, L.G. Bulusheva, A.V. Gusel'nikov, V.L. Kuznetsov, Yu.V. Butenko // *Carbon.* – 2004. – Vol. 42, No 5–6. – P. 1099–1102.

70. Karabutov, A.V. Low-field electron emission of diamond/pyrocarbon composites / A.V. Karabutov, V.D. Frolov, V.I. Konov, V.G. Ralchenko, S.K. Gordeev, P.I. Belobrov // *J. Vac. Sci. Technol. B.* – 2001. – Vol. 19. – P. 965–970.

71. Яфаров, Р.К. Получение наноалмазных композиционных материалов в плазме микроволнового газового разряда низкого давления / Р.К. Яфаров // *ЖТФ.* – 2006. – Т.76, Вып. 1. – С. 42–48.

72. Усанов, Д.А. Исследование автоэлектронной эмиссии из наноуглеродных материалов: Учеб. пособие для студ. фак. нано- и биомедицинских технологий / Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2006. – 23 с.

73. Вейнгер, А.И. Электрофизические исследования нанопористых углеродных материалов, приготовленных из порошков карбида кремния / А.И. Вейнгер, Б.Д. Шанина, А.М. Данишевский, В.В. Попов, С.К. Гордеев, А.В. Гречинская // *ФТТ.* – 2003. – Т. 45, Вып. 6. – С. 1141-1150.

74. Захидов, Ал. А. Механизм низковольтной эмиссии электронов из наноуглеродных материалов / Ал. А. Захидов, А.Н. Образцов, А.П. Волков, Д.А. Ляшенко // ЖЭТФ. – 2005. – Т. 127, Вып. 1. – С. 100–106.

75. Eydelman, E.D. The strong thermoelectric effect in nanocarbon generated by the ballistic phonon drag of electrons / E.D. Eidelman, A.Ya. Vul' // J. Phys. Condens. Matter. – 2007. – Vol. 19, No 26. – 266210.

76. Месяц, Г.А. Взрывная электронная эмиссия / Г.А. Месяц. – М.: Физматлит, 2011. – 280 с.

77. Проскуровский, Д.И. Эмиссионная электроника: Учеб. пособие для вузов. / Д.И. Проскуровский. – Томск: Томский государственный университет, 2010. – 288 с.

78. Кудинцева, Г.А. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников. – М.: Энергия, 1966. – 368 с.

79. Апин, М.П. Современные импульсные ЛБВ производства АО «НПП «Алмаз» и перспективы их использования / М.П. Апин, С.М. Бондаренко, С.И. Кузюткин, С.А. Нефедов, И.В. Поляков, Е.А. Терешин // Материалы юбилейной конференции АО «НПП «Алмаз». Электронные приборы и устройства СВЧ. 18-19 сентября 2017. Саратов. – С. 52-57.

80. Анпилов А.М., Бархударов Э.М., Косый И.А., Мисакян М.А. Способ получения наноструктурированного углеродного покрытия. Патент RU № 2565199 от 20.10.2015 г., МПК: C01B 31/02, B82B 3/00, B82Y 40/00.

81. Jin Chenggang, Huang Tianyuan, Yang Yan, Yang Dongjin, Hu Yibo, Zhuge lanjian, Wu Xuemei Material for suppressing secondary electron emission. Патент CN № 104241061 (A) от 24.12. 2014 г., МПК: H01J 1/14.

82. Bundaleska, N. Prospects for microwave plasma synthesized N-graphene in secondary electron emission mitigation applications / N. Bundaleska, A. Dias, N. Bundaleski, E. Felizardo, J. Henriques, D. Tsyganov, M. Abrashev, E. Valcheva, J. Kisoovski, A. M. Ferraria, A. M. Botelho do Rego, A. Almeida, J. Zavašnik, U.

Cvelbar, O. M. N. D. Teodoro, Th. Strunskus, E. Tatarova // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – 13013.

83. Hu Wenbo, Yi Xingkang, Li Jie, Gao Buyu, Li Yongdong, Wu Shengli, Lin Shu Carbon-based film for inhibiting secondary electron emission and preparation method thereof. Патент CN № 110396668 (A) от 01.11.2019 г., МПК: C23C 14/02, C23C 14/06, C23C 14/16, C23C 14/34, C23C 14/58.

84. Яфаров, Р.К. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. – М.: Физматлит, 2009. – 216 с.

85. Усанов, Д.А. Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода: учеб.-метод. пособие для студентов фак. нано- и биомед. технологий / Д. А. Усанов, Р. К. Яфаров. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. – 124 с.

86. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1977. – 672 с.

87. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. – М.: Наука, 2006. – 490 с.

88. Каретникова Т.А. Особенности распространения электромагнитных волн в замедляющих системах типа плоских гребенок и их взаимодействия с ленточным электронным потоком в терагерцевом диапазоне частот: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.03/ Каретникова Татьяна Андреевна. – Саратов, 2016. – 144 с.

89. Gamzina, D. Mechanical Design and Manufacturing of W-Band Sheet Beam Klystron / D. Gamzina, L.R. Barnett, B. Ravani, N.C. Luhmann // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 2017. – Vol. 64, No 6. – P. 2675-2682.

90. Wang, Z. A non-axisymmetric structure multistage depressed collector for sheet beam VEDs / Z. Wang, X. Xu, Y. Gong, Z. Duan, Y. Wei, H. Gong, H. Liu // *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium (IVEC)*. – 2017. – P. 403-412.

91. Pasour, J. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz / J. Pasour, E. Wright, K.T. Nguyen, A. Balkcum, F.N. Wood, R.E.

Myers, B. Levush // IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1630-1636.

92. Pchel'nikov, Y. Optimization of a Sheet Electron Beam Interaction With a Slow Wave / Y. Pchel'nikov, A. Yelizarov // IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1661-1665.

93. Ruan, C. Theoretical and experimental investigation on intense sheet electron beam transport with its diocotron instability in a uniform magnetic field / C. Ruan, S. Wang, Y. Han, Q. Li, X. Yang // IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1643-1650.

94. Pasour, J. Demonstration of a 100-kW solenoidally focused sheet electron beam for millimeter-wave amplifiers / J. Pasour, K. Nguyen, E. Wright, A. Balkcum, J. Atkinson, M. Cusick, B. Levush // IEEE Trans. Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, No 6. – P. 1792-1797.

95. Pershing, D. Demonstration of a wideband 10-kW Ka-band sheet beam TWT amplifier / D. Pershing, K. Nguyen, D. Abe, E. Wright, P. Larsen, J. Pasour, S. Cooke, A. Balkcum, F. Wood, R. Myers, B. Levush // IEEE Trans. Electron Devices. – 2014. – Vol. 61, No 6. – P. 1637-1642,

96. Быковский С.В. Циклотронные защитные устройства / С.В. Быковский // Радиоэлектроника. – 2021. - Т. 13, Вып. 3. – С. 297-302.

97. Будзинский Ю.А., Быковский С.В. и др. Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство. Патент на изобретение RU 2631923 С1, 29.09.2017. Заявка № 2016114977 от 18.04.2016.

98. Ye, H. Influence of Surface Microstructures on Explosive Electron Emission Properties for Graphite Cathodes / H. Ye, W. Hong, C. Xingyu, C. Bin, W. Ping, B. Shuxin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2017. – Vol. 45, No 6. – P. 959-968.

99. Filip, V. Review on peculiar issues of field emission in vacuum nanoelectronic devices / V. Filip, L.D. Filip, W. Hei // Solid-State Electronics. – 2017. – Vol. 138. – P. 3-15.

100. Яфаров, Р. К. Микроструктурные модификации алмазографитовых нанокompозитов для сильноточных полевых источников электронов / Яфаров Р. К. // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, Вып. 12. - С . 1238–1243.
101. Roy, A. Emission properties of explosive field emission cathodes / A. Roy, A. Patel, R. Menon, A. Sharma, D. P. Chakravarthy, D. S. Patil // Physics of Plasmas. – 2011. – Vol. 18. – 103108.
102. Chuan, J. Microstructure Characterization of Graphite Cathodes for Explosive Field-Emission / J. Chuan, H. Wan, J. Yang, F. Zhou // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 248. – P. 268-273.
103. Liu, G. Research on an improved explosive emission cathode / G. Liu, J. Sun, H. Shao, C. Chen, X. Zhang // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol. 42. – 125204.
104. Капцов, Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. / Н.А. Капцов. – М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950. – 836 с.
105. Shiffler, D. Emission uniformity and emission area of explosive field emission cathodes / D. Shiffler, M. Ruebush // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 79. – 2871.
106. Zhou, F. Explosive electron emission from a surface-modified carbon/carbon composite cathode / F. Zhou, H. Wan, J. Chuan, S. Bai, J. Yang // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol. 46. – 305203.
107. Яфаров, Р.К. Вакуумно-плазменные процессы при экстремальной полевой эмиссии в алмазографитовых источниках электронов / Р.К. Яфаров, Д.В. Нефедов, А.В. Сторублев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2021. – Т. 21, Вып. 1. – С. 69–79.
108. Королев, Б.И. Основы вакуумной техники / Б.И. Королев. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 400 с.
109. Яфарова, Р.К. Долговечность сильноточных полевых источников электронов на основе нанокompозитных алмазографитовых пленочных структур / Р. К. Яфаров, А. В. Сторублев // Микроэлектроника. – 2022. – Т. 51, Вып. 2. – С. 95-100.

110. Крачковская, Т.М. Исследование характеристик металлопористого катода, модифицированного нанокремнеземом / Т.М. Крачковская, А.В. Сторублев, Г.В. Сахаджи, А.С. Емельянов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2018. – Вып.4. – С. 57-63.

111. Крачковская, Т.М. Перспективы применения различных форм нанокремнезема в катодных системах / Т.М. Крачковская, Л.А. Мельников // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3(542). – С. 6-14.

112. Яфаров, Р.К. Долговременная воспроизводимость эмиссионных характеристик алмазграфитовых полевых источников электронов в нестационарных вакуумных условиях эксплуатации / Р.К. Яфаров, А.В. Сторублев // ПЖТФ. – 2021. – Т. 47, Вып. 24. – С. 17-19.

113. Яфаров, Р.К. Нанокремнеземные композиты для безнакальных магнетронов СВЧ и субтерагерцового диапазонов / Р.К. Яфаров, Н.О. Шабунин, В.Я. Шаныгин, А.М. Захаревич // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2020. – Т. 20, Вып. 2. – С. 134-143.

114. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.