

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по науке и
инновациям

СГТУ имени Гагарина Ю.А.,

К.Т.Н.

Кузьбязкина А.В.



назр

2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» Министерства образования и науки Российской Федерации на диссертационную работу Сторублева Антона Вячеславовича «Получение и исследование функциональных покрытий на основе наноуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцевой микроэлектроники», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Диссертационная работа Сторублева Антона Вячеславовича посвящена совершенствованию технологии производства и улучшению характеристик источников электронов и катодно-сеточных узлов устройств СВЧ и субтерагерцевого диапазонов средней и высокой мощности.

В последние годы приборы вакуумной микроволновой электроники все шире применяются во многих отраслях науки и техники, ускоряя научно-технический прогресс. Почти во всех технически развитых странах ведутся работы по освоению нового коротковолнового диапазона электромагнитных колебаний - диапазона терагерцевых длин волн.

Приборы СВЧ и субтерагерцевого диапазонов находят широкое применение как в наземных, так и в космических радиотехнических устройствах, для навигации, радиолокации и связи. При создании таких приборов возникает проблема разработки источников электронов с требуемыми параметрами и характеристиками, при этом перспективным направлением их разработки является применение автоэмиссионных катодов (АЭК).

Создание приборов вакуумной электроники СВЧ и субтерагерцевого диапазона с безнакальными АЭК является актуальной задачей, равно как и совершенствование существующих конструкций катодно-сеточных узлов (КСУ), выполненных с применением металло-пористых катодов (МПК). Интерес к АЭК обусловлен наличием таких особенностей, как мгновенное время готовности, отсутствие накала, высокая плотность тока, а также большая крутизна вольт-амперной характеристики. Однако, внедрение АЭК сдерживается рядом факторов, самыми важными из которых являются недостаточная надежность и долговечность. Решением данной проблемы может

стать применение углеродных материалов, в основе которых лежит алмазографитовый композит, обладающий повышенной устойчивостью к распылению ионами остаточной атмосферы, а также обеспечивающий стабильное функционирование в электрических полях повышенной напряженности. Вместе с тем, варьирование параметрами получения алмазографитовых композитов позволяет синтезировать структуры с повышенной работой выхода, которые могут быть применены в качестве низкоэмиссионных покрытий сеточных элементов КСУ.

Таким образом, тема исследования Сторублева А.В., направленная на совершенствование технологии производства и улучшение характеристик полевых источников электронов и катодно-сеточных узлов электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ и субтерагерцевого диапазонов средней и высокой мощности, является **актуальной**.

Научная новизна диссертационной работы. В ходе выполнения исследований соискателем получены новые важные результаты:

1. Установлены 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. Показано, что АЭК на основе низкоомных алмазографитовых структур, по сравнению с высокоомными, имеют высокую крутизну ВАХ, более низкий порог напряженности поля начала автоэмиссии, а максимальный автоэмиссионный ток достигается при меньшей напряженности электрического поля.

4. Установлено влияние плазменного фторирования углеродных покрытий на эмиссионную способность управляющих сеток ЭВП и 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, что позволяет в разы увеличить долговечность ЭВП.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- корректной постановкой и решением рассматриваемых задач, грамотной обработкой и анализом экспериментальных данных;

-согласованностью полученных теоретических и экспериментальных результатов;

-использованием апробированных методов исследования и аттестованной аппаратуры.

Практическая значимость, ценность и реализация результатов работы.

1. Разработаны новые научно-технические решения, улучшающие эмиссионные и эксплуатационные характеристики мощных ЭВП СВЧ и

субтерагерцевого диапазонов. В частности, испытания на долговременную воспроизводимость характеристик сильноточных полевых алмазографитовых катодов при изменении вакуума в диапазоне от $9 \cdot 10^{-6}$ Па до 0,1 Па и аварийным отключением нестабилизированного питающего напряжения суммарной длительностью свыше 13,5 часов показали, что полевой ток изменялся в пределах от 6 до 8 мА, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора $1,3 \cdot 10^3$ А/см².

2. 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.

3. Разработана технологическая методика получения углеродного антиэмиссионного сеточного покрытия КСУ ЭВП, обеспечивающая увеличение работы выхода электронов, что позволяет увеличить КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных ЭВП.

Практическая ценность работы представляет интерес для предприятий и научно-исследовательских институтов, занимающихся исследованиями и разработкой приборов вакуумной СВЧ электроники. Результаты могут быть **рекомендованы к использованию** в следующих организациях: АО «НПП «Алмаз» (г. Саратов), АО «НПП «Исток им. Шокина» (г. Фрязино), АО «НПП «Торий» (г. Москва), АО «НПП «Контакт» (г. Саратов), ФГБУН «ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН» (г. Москва), ФГБУН «ФИЦ ИПФ РАН» (г. Нижний Новгород) и др.

По материалам 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.

Результаты, представленные в диссертации, были использованы при выполнении грантов РФФИ №19-38-90216 и РНФ №16-19-10033, а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров кафедры «Физика твердого тела» СГУ имени Н.Г. Чернышевского.

Материал диссертации изложен стилистически грамотно, в соответствии с требованиями, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Представленная работа не лишена некоторых **недостатков**.

1. В главе 3 на рисунке 3.2 приведены автоэмиссионные вольт-амперные характеристики, снятые для образцов с «низким» и «высоким» сопротивлением. Так для образца с «низким» сопротивлением ВАХ имеет ярко выраженный экспоненциальный характер, то для образца с «высоким» сопротивлением очевидно сильное отклонение от экспоненты, но с чем это связано не говорится.

2. Из информации, приведенной в разделе 3.3 не до конца понятно, как может быть обеспечена стабильность / воспроизводимость токов экстремальной полевой эмиссии, если в ходе ее протекания имеет место распыление графитовой фазы, которая осуществляет подвод электронов к эмиссионным центрам.

3. В разделе 4.1 при анализе влияния остаточной атмосферы на автоэмиссионные характеристики АЭК делается предположение, что увеличение порога начала эмиссии и снижение автоэмиссионного тока являются следствием увеличения поверхностного сопротивления эмиссионной структуры, вызванного бомбардировкой высокоэнергетичными ионами азота с образованием нитридов углерода. При этом в следующем разделе приводится ВАХ после испытаний алмазографитового АЭК в нестационарных температурно-вакуумных условиях, демонстрирующая стабильность автоэмиссионных параметров.

4. В таблице 5.1 раздела 5.2 приведены испытательные режимы по температуре катода и длительности работы КСУ, при этих температурах катода. Указаны различные температурные режимы катода от 950 до 1200 °С. Из таблицы следует, что катод в составе КСУ работал при разных температурах и длительностях выдержки при этих температурах в пределах суммарного времени каждого этапа испытаний. В разделе 5.3 на рис. 5.11 представлена зависимость тока сетки от длительности работы катода в составе КСУ. При этом не объясняется как рассчитывалась длительность работы катода в составе КСУ на каждом этапе испытаний и итоговая длительность испытаний.

Однако отмеченные недостатки не уменьшают научно-техническую значимость проведенного исследования и не снижают положительную оценку работы.

Диссертация Сторублева А.В. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Получение и исследование функциональных покрытий на основе наноуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцевой микроэлектроники» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальных научно-технических проблем, связанных с разработкой АЭК и эмиссионных покрытий для применения в КСУ ЭВП. В работе изложены новые научно обоснованные теоретические разработки, имеющие существенное значение для развития электронной техники страны. Тема диссертации соответствует специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств». Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, и включает все научные положения, а также основные выводы и результаты.

Основываясь на актуальности поставленной задачи, достоверности и обоснованности результатов, а также на приведенной практической значимости и новизне, можно сделать вывод, что диссертация соответствует требованиям п.п. 9,11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено

постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Сторублев Антон Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств».

Отзыв составили:

Почетный работник высшей школы РФ, д.т.н., профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, +7-8452-99-88-29, tsarev_va@mail.ru



В. А. Царев

Д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, +7-8452-99-88-29, alexm@sstu.ru

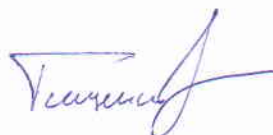


А.Ю. Мирошниченко

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры «Электронные приборы и устройства» протокол № 9 от «02» ноября 2022 г.

Подписи Владислава Алексеевича Царева и Алексея Юрьевича Мирошниченко заверяю

Ученый секретарь Ученого совета СГТУ имени Гагарина Ю.А., д. культурологии, доцент



Н. В. Тищенко