

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,  
МИНОБРНАУКИ РОССИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 02.12.2022 № 26

О присуждении **Сторублеву Антону Вячеславовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Получение и исследование функциональных покрытий на основе наноуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств» принята к защите 16 сентября 2022 г. (протокол заседания № 20) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»), Минобрнауки РФ, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33.

Соискатель Сторублев Антон Вячеславович, 1989 года рождения, окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет

имени Н.Г. Чернышевского» в 2011 г. по специальности «Медицинская физика» с присвоением квалификации «физик».

Диссертация подготовлена в период обучения с 2017 по 2021 г. в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы связи, направленность «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Справка о сданных кандидатских экзаменах № 44-2021 выдана 24.05.2021 г. ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». Работает начальником лаборатории в подразделении НПК-12 НПЦ «Электронные системы», Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов.

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

Научный руководитель — Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов, Институт физики, кафедра физики твердого тела, профессор.

Официальные оппоненты:

1. **Архипов Александр Викторович**, доктор физико-математических наук (01.04.04), ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург); Высшая инженерно-физическая школа, профессор;

2. **Тимошенков Сергей Петрович**, доктор технических наук (05.27.06), профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет — «Московский институт электронной техники» (г. Москва, г. Зеленоград); кафедра микроэлектроники, профессор; Институт нано- и микросистемной техники, директор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный

технический университет имени Гагарина Ю.А.» (г. Саратов) в своем положительном отзыве, подписанном Царевым Владиславом Алексеевичем, доктором технических наук (05.27.02), профессором кафедры «Электронные приборы и устройства», Мирошниченко Алексеем Юрьевичем доктором технических наук (05.27.02), заведующим кафедрой «Электронные приборы и устройства» указала, что диссертация Сторублева Антона Вячеславовича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой представлены теоретические и экспериментальные исследования, связанные с разработкой автоэмиссионных катодов и низкоэмиссионных покрытий для применения в КСУ ЭВП. Учитывая актуальность изученного вопроса, научную новизну, практическую значимость полученных результатов, их достоверность и обоснованность выводов, можно заключить, что диссертационная работа Сторублева А.В. «Получение и исследование функциональных покрытий на основе нанокремниевых композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» отвечает требованиям пп. 9, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, а ее автор Сторублев А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и наноконструктивной микроэлектроники, квантовых устройств».

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, все по теме диссертации, общим объемом 8,951 п.л. (авторский вклад 3,593 п.л.), из них 7 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций (включая 4 статьи в журналах, входящих в базы SCOPUS или Web of Science), 7 работ в прочих изданиях, входящих в РИНЦ, получено 2 патента на изобретения РФ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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

2. Yafarov R. K., Nefedov D. V., **Storablev A. V.** Vacuum-plasma processes at extreme field emission in diamond electron sources. // Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics, 2021, vol. 21, iss. 1, P. 69–79.
3. Yafarov R. K., **Storablev A. V.** Durability of High-Current Field Sources of Electrons Based on Nanocomposite Diamond-Graphite Film Structures // Russian Microelectronics, 2022, Vol. 51, No. 2, P. 54–58.
4. Горева Т.А., Золотых Д.Н., **Сторублев А.В.**, Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионным катодом. Патент на изобретение RU 2713381 С1, 05.02.2020.

На автореферат диссертации поступило 6 положительных отзывов:

из НИИ Молекулярной электроники (Москва, Зеленоград) от д.т.н. (05.27.06) Бокарева В.П.; из Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» от д.ф.-м.н. (05.27.01) Ильичёва Э.А., из Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН от д.ф.-м.н. (01.04.04) профессора Кошелец В.П.; из Башкирского государственного университета от д.ф.-м.н. (01.04.04) профессора Бахтизина Р.З.; из Института проблем точной механики и управления – обособленного структурного подразделения ФИЦ «Саратовский научный центр РАН» от д.ф.-м.н. (05.13.18, 05.27.02) Якунина А.Н.; из АО «Плутон», г. Москва, от к.т.н. (05.27.06) Ханбекова И.Ф.

В отзывах сделаны замечания:

о заметном различии (в лучшую сторону) между планируемым целевым параметром плотности тока эмиссии с единицы поверхности катода и полученным результатом; об отсутствии в главе 4 автореферата указания о режиме работы источника электрического поля при испытании эмиттера на долговечность; о желательности проведения более тонкого анализа полученных автоэмиссионных характеристик катода с определением величины потенциального барьера; о желательности представления результатов эмиссии катода также с координатой «Разность потенциалов»; о желательности проведения дополнительного анализа механизма свечения торца эмиттирующей алмазографитовой плёнки при плотности тока  $1000 \text{ A/cm}^2$ ; о мелком шрифте, используемом на многих рисунках;

Выбор официальных оппонентов обосновывается близким соответствием проводимых ими исследований теме диссертации, их высокой квалификацией в области исследования физических явлений, связанных с формированием электрического поля и исследованием эмиссионного тока, в том числе из углеродных структур, позволяющей оценить научную и практическую значимость диссертационной работы, широкой известностью и признанными достижениями среди специалистов. Выбор официальных оппонентов объясняется, кроме того, отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается её высоким авторитетом среди научно-исследовательских организаций, наличием в коллективе большого числа известных специалистов, работающих в направлениях, связанных с тематикой диссертации, а также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** физико-технологические методики получения композиционных пленочных структур, представляющих собой графитовые матрицы с включениями алмазных нанокристаллитов с размерами от 5-10 нм до 100 нм и плотностью до  $10^8 \text{ см}^{-2}$ , имеющих различные поверхностные электропроводности, для полевых источников электронов с плотностью полевого свыше  $1000 \text{ А/см}^2$ , удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям, включая получение атоэмиссионных ВАХ с заданными крутизной, критичностью к изменению управляющих напряжений, порогами начала полевой эмиссии и максимальными автоэмиссионными токами;

**показано**, что взаимосвязь между пороговыми напряженностями полевой эмиссии электронов в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности и удельными поверхностными сопротивлениями алмазографитовых композитов описывается законом Ома. Максимальные автоэмиссионные токи, характеризующие переход от режима устойчивой эмиссии к взрывной эмиссии,

зависят от поверхностного сопротивления углеродных пленочных композитов и имеют максимум при определенных его значениях. В низкоомных структурах основным механизмом разрушения полевых катодов при экстремальных режимах эксплуатации является ударная ионизация, в высокоомных – эффект Зинера;

**установлен** различный характер вакуумно-плазменных процессов, возникающих при экстремальной полевой эмиссии в алмазографитовых источниках электронов. В случае низкоомных алмазографитовых структур причинами нестабильности параметров эмиссии и разрушения является возникновение на катоде «сетки» электротепловых пробоев, характерных для тонких диэлектрических покрытий при протекании скользящего поверхностного электрического разряда. В высокоомных структурах основным характером разрушения в экстремальных режимах эксплуатации является эрозия катодной части пленки. Эрозия обусловлена взрывной эмиссией электронов с эмиссионных центров композитной структуры с возникновением факелов катодной плазмы и распылением графитовой компоненты материала катода на анод и в межэлектродный промежуток;

**предложен** новый физико-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. Показано, что плазменное фторирование графитоподобных углеродных пленок увеличивает работу выхода электронов, ток с управляющей сетки с фторированным углеродным покрытием уменьшается более, чем в пять раз, 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 превышает один порядок.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**доказана** возможность получения с использованием низкоэнергетичной микроволновой плазмы низкого давления углеродных пленочных структур с различным содержанием графитовой и мелкокристаллической алмазных фаз, обладающих различными электрофизическими свойствами и работой выхода

электронов, которые могут быть использованы для создания полевых источников электронов с различными схмотехническими характеристиками, а также коллекторов электронов и антиэмиссионных пленочных покрытий в катодно-сеточных узлах мощных ЭВП СВЧ и субтерагерцового диапазонов;

**показано**, что, вследствие различных механизмов генерации и рассеивания носителей заряда в сильных электрических полях, полевые источники электронов на основе низкоомных алмазграфитовых структур, по сравнению с высокоомными, имеют высокую крутизну ВАХ, более низкий порог напряженности поля начала автоэмиссии, а максимальный автоэмиссионный ток достигается при меньшей напряженности электрического поля. Диапазон рабочих напряжений, обеспечивающий одинаковый максимальный полевой ток, у высокоомных источников электронов в разы больше, чем у низкоомных.

**изучены** фундаментальные физические факторы и процессы, ограничивающие максимальную плотность тока, крутизну ВАХ, стабильность и долговечность полевых источников электронов на основе композитных алмазграфитовых пленочных структур;

**предложены** физико-химические механизмы формирования антиэмиссионных свойств углеродных покрытий с плазменным фторированием поверхности;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**обоснованы и разработаны** физико-технологические методики создания сильноточных полевых источников электронов на основе алмазграфитовых пленочных структур, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям;

**показано**, что наиболее высокая крутизна автоэмиссионных ВАХ, обеспечивающая повышенное быстродействие полевых источников электронов в устройствах СВЧ и субтерагерцового диапазонов, реализуется в полевых источниках электронов на основе алмазграфитовых пленочных композитов с высокой поверхностной электропроводностью;

**установлена** долговременная воспроизводимость эмиссионных характеристик полевых источников электронов на основе композитных углеродных пленочных

покрытий с плотностью автоэмиссионного тока более  $1000 \text{ A/cm}^2$  в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации;

**предложен** способ восстановления/улучшения долговременной эмиссионной способности алмазграфитовых источников электронов при эксплуатации со сверхвысокими плотностями токов в составе мощных ЭВП СВЧ путём обратного осаждения углеродной фазы, распылённой с катода на анод и другие близлежащие электроды.

**обоснован и разработан** физико-технологический процесс получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий с повышенной работой выхода вторичных электронов и низкой скоростью термического осаждения на них активных примесных добавок МПК КСУ мощных СВЧ устройств, использование которых повышает длительность их эксплуатации более, чем в три раза.

результаты исследований использованы при выполнении грантов 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.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** достоверность результатов обеспечена применением утвержденных производственных методик и серийных технологий, аттестованного измерительного оборудования, а также воспроизводимостью результатов; применением современной контрольно измерительной и диагностической аппаратуры, проведением различных параллельных методов характеристики полученных материалов и получением непротиворечивых друг другу результатов (атомно-силовой и электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и комбинационного рассеяния света, др. методов), обработка экспериментальных данных проводилась с использованием программного обеспечения используемой приборной базы и статистических методов на ЭВМ;

**установлены** количественные и качественные совпадения полученных результатов с классическими представлениями и описаниями полевых эмиссионных процессов, базирующихся на теории Фаулера и Нордгейма. Построение физико –



химических моделей получения антиэмиссионных пленочных покрытий КСУ мощных СВЧ ЭВП проводилось с использованием современных представлений о механизмах дипольной поляризации и конденсации тонких пленок из газовой фазы;

**использованы** специализированные программные пакеты, входящие в состав применяемой измерительной аппаратуры и позволяющие с высокой точностью и надежностью контролировать процесс сбора данных и их обработки для получения достоверной информации о характеристиках исследуемых структур и процессов.

**Личный вклад соискателя** выразился в проведении экспериментальных исследований, обработке результатов измерений, в применении моделей, адекватно описывающих результаты экспериментов, и анализе полученных результатов. Защищаемые научные положения и результаты принадлежат автору.

Результаты представленных в диссертации исследований рекомендованы к использованию на предприятиях и в организациях электронной промышленности РФ (АО «НИИМЭ», г. Москва, г. Зеленоград, АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Московская область, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, АО «Плутон», г. Москва, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов, АО «НПП «Салют», г. Н. Новгород);

в высших учебных заведениях Минобрнауки РФ (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, ФГАУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», г. Москва, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»),

В институтах РАН (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, ФГБУН Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, г. Москва, Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов,

Содержание диссертации удовлетворяет требованиям п.п. 9-11,13,14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания о необходимости: а) пояснить понятие повышенного парциального давления азота, б) прокомментировать, как наблюдались катодные факелы при плотности отбора тока с поверхности катода около  $1000 \text{ А/см}^2$ , в) указать вольт-амперные характеристики, полученные в катодно-сеточных узлах, г) пояснить характерные размеры экспериментальных макетов и исследуемых образцов, в том числе повлиявшие на расчёт плотности отбираемого тока, д) объяснить понятие скользящего электрического разряда, которым описывается результат эксперимента с низкоомным образцом

Соискатель Сторублев А.В. ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации, официальных оппонентов и отзывах на автореферат, на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) о получении плотности тока с поверхности катода  $1000 \text{ А/см}^2$ ; 2) режиме работы источника питания в эксперименте с долговечностью автокатода; 3) об использовании координаты «разность потенциалов»; 4) о механизме свечения в вакуумном зазоре между катодом и анодом при высокой плотности тока автоэмиссии; 5) об исключении емкостного тока при импульсных режимах работы аппаратуры; 6) о возможности анализа морфологии исследуемых образцов методами АСМ с помощью зонда с диаметром  $10 \text{ нм}$ ; 7) зависимости температуры сеточного электрода от мощности, выделенной на нём; 8) различной крутизне ВАХ в зависимости от сопротивления исследуемого образца; 9) о формуле, используемой при расчёте длительности эксперимента с низкоэмиссионными покрытиями; 10) понятию повышенное парциальное давление, использованном в работе; 11) о появлении катодных факелов при высокой плотности отбираемого тока с поверхности катода; 12) геометрических размерах макета для испытаний; 13) о понятии скользящего электрического разряда на поверхности автоэмиссионных образцов.

Диссертация Сторублева А.В. содержит решение актуальной задачи по улучшению характеристик электронных устройств микроэлектроники (полевых

источников электронов и катодно-сеточных узлов изделий СВЧ и субтерагерцового диапазонов длин волн средней и высокой мощности) и по совершенствованию технологии их производства.

На заседании 02 декабря 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Сторублеву А.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 24 человека (23 человек находился в месте проведения заседания, 1 человек участвовал в заседании совета в удаленном интерактивном режиме), из них 9 докторов по специальности 2.2.2. «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств», участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за 24, против – нет, воздержавшихся – нет.

Председатель  
диссертационного совета



Аникин Валерий Михайлович

И. о. ученого секретаря  
диссертационного совета

Стрелкова Галина Ивановна

02 декабря 2022 г.