

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и цифровому развитию  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Саратовский национальный  
исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского»



профессор, д.ф.-м.н.

Алексей Александрович Короновский

« 4 » сентября 2021 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по диссертации Сторублева Антона Вячеславовича «Получение и исследование функциональных покрытий на основе наноуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств, выполненной на кафедре физики твердого тела Института физики.

Тема диссертации утверждена приказом ректора №242-Д от 26 декабря 2017 года, переутверждена приказом ректора №66-Д от 17 мая 2021 года.

Сторублев Антон Вячеславович в 2011 г. окончил ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и получил квалификацию физик по специальности медицинская физика.

Справка об обучении в аспирантуре № 44-2021 выдана 24.05.2021 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации с 2017 года по настоящее время Сторублев Антон Вячеславович обучается 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».

Научным руководителем приказом ректора №242-Д от 26.12.2017 назначен Усанов Дмитрий Александрович. Приказом ректора N 145-Д от 01.08.2019 научным руководителем назначен Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», представивший положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании кафедры физики твёрдого тела Института физики с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других научных учреждений. На заседании присутствовали:

1. Скрипаль Ал.В., - профессор, д. ф.-м.н., заведующий кафедрой физики твёрдого тела,
2. Названов В.Ф., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твёрдого тела
3. Семенов А.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твёрдого тела
4. Яфаров Р.К. д.т.н., профессор кафедры физики твёрдого тела
5. Скрипаль Ан.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики,
6. Михайлов А.И., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников
7. Аникин В.М., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
8. Глухова О.Е., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой радиотехники и электродинамики,
9. Вениг С.Б., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, технологии и управления качеством,
10. Роках А.Г., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики полупроводников,
11. Мирошниченко А.Ю., д. т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» СГТУ им. Ю.А. Гагарина,
12. Трофимова Н.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела,
13. Феклистов В.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела,
14. Постельга А.Э., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела,
15. Пономарев Д.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела,
16. Добдин С.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела,
17. Рыгтик А.П., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
18. Латышева Е.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твёрдого тела.

Рецензенты диссертации:

Михайлов Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников представил положительный отзыв,

Мирошниченко Алексей Юрьевич д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электронные приборы и устройства» Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина представил положительный отзыв.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Диссертационная работа Сторублева Антона Вячеславовича «Получение и исследование функциональных покрытий на основе наноуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств представляет законченное исследование, посвящённое совершенствованию технологии производства и характеристик источников электронов и катодно сеточных узлов устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности и соответствует требованиям п.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

*Актуальность темы* диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования электронной компонентной базы систем спутниковой связи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия и проч., которые основываются на трех главных составляющих: увеличении частотного диапазона и выходной мощности, снижении времени готовности. Основная проблема при создании мощных источников когерентного субтерагерцового излучения заключается в получении источников электронов со сверхвысокими плотностями тока, что в немалой степени, кроме увеличения мощности, обусловлено уменьшением размеров приборов. Перспективным направлением разработки является замена термоэмиссионных катодов на полевые катоды. Преимущества последних хорошо известны. Однако, несмотря на значительные усилия ученых многих стран мира и достижения в технологии полупроводниковой микроэлектроники, до сих пор не удалось достичь существенного прогресса в создании приборов с автоэмиссионными катодами. Поэтому 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.

*Новизна исследований, проведенных в ходе диссертационной работы, состоит в следующем.*

1. Установлены фундаментальные факторы и процессы, ограничивающие максимальную плотность тока, стабильность и долговечность полевых источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур.
2. Впервые определены технологические возможности создания сильноточных полевых источников электронов на основе алмазографитовых пленочных структур, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям, включая получение ВАХ с различными крутизной, порогами начала эмиссии и максимальными полевыми токами.

3. Показано, что 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. Диапазон рабочих напряжений, обеспечивающий одинаковый максимальный автоэмиссионный ток, у высокоомных источников электронов в разы больше, чем у низкоомных. Предложена теоретическая интерпретация механизмов, обеспечивающих получение заданных экспериментальных результатов.

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

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

1. Разработаны технологические методики создания сильноточных полевых источников электронов на основе планарно-торцевых алмазографитовых пленочных структур, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям.

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

3. Испытания на долговременную воспроизводимость характеристик сильноточных алмазографитовых АЭК в нестационарных температурно-вакуумных условиях эксплуатации с 8 циклами изменения вакуума в диапазоне от  $9 \cdot 10^{-6}$  Па до 0,1 Па и аварийным отключением нестабилизированного питающего напряжения суммарной длительностью свыше 13,5 часов показали, что полевой ток изменялся в пределах от 6 до 8 мА, что составляет около 25% при средней плотности токоотбора  $1,3 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>.

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 силовых источников электромагнитных излучений, обеспечивающая увеличение работы выхода электронов и уменьшение вероятности прилипания на сетки термически испаренных атомов активных примесей МПК. При этом замедляются изменения термо- и вторичной электронной эмиссия в КСУ, увеличивается КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных СВЧ устройств.

*Личный вклад* автора выразился в проведении экспериментальных исследований, обработке результатов измерений, в применении моделей, адекватно описывающих результаты экспериментов, и анализе полученных результатов. Представленные в диссертацию основные результаты и выводы получены лично соискателем.

*Достоверность результатов диссертации* обеспечивается использованием современной измерительной аппаратуры и апробированных методов измерений при выполнении экспериментальных исследований, обоснованностью выбранного метода описания экспериментальных результатов, обработкой экспериментальных данных с использованием стандартных методов, качественным и количественным соответствием полученных результатов данным из известных литературных источников.

*Апробация работы.* Работа выполнена на кафедре физики твердого тела Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в 2016-2021 годы. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

1. X Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2021 г. (г. Санкт-Петербург),
2. VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2019 г. (г. Санкт-Петербург),
3. VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2018 г. (г. Санкт-Петербург),
4. IV Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» 2015 г. (г. Санкт-Петербург),
5. VIII Всероссийской школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2021 г. (г. Саратов),
6. VII Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, материалами и биообъектами» 2020 (г. Саратов),
7. XV Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и

нелинейная физика» 2020 (г. Саратов),

8. IX научной конференции молодых ученых Presenting Academic Achievements to the World. Natural Science 2019 (г. Саратов).

9. Научных семинарах кафедры физики твердого тела СГУ.

Результаты диссертационной работы 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.

Диссертационная работа Сторублева Антона Вячеславовича соответствует специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Материалы работы в полном объеме изложены в 16 работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК, 4 работы, включенные в базы SCOPUS и Web of Science, 7 работ в прочих изданиях, входящих в РИНЦ, получено 2 патента на изобретения РФ. Материалы диссертации докладывались на 8 международных и Всероссийских научных конференциях, опубликованы в сборниках их работ.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В рецензируемых научных изданиях и изданиях, входящих в международные наукометрические базы:

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

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

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

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

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

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

6. Сахаджи Г.В., Крачковская Т.М., Журавлев С.Д., Сторублев А.В. Скандиевый

катод: определение направления развития оптимальной технологии изготовления // Радиотехника. 2017. № 7. С. 60-63.

Патенты РФ:

7. Горева Т.А., Золотых Д.Н., Сторублев А.В., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионным катодом. Патент на изобретение RU 2713381 C1, 05.02.2020. Заявка № 2019120570 от 01.07.2019.

8. Сторублев А.В., Крачковская Т.М., Сахаджи Г.В. Способ измерения рабочей температуры катода в пушке или в составе электронного прибора. Патент на изобретение RU 2713229 C1, 04.02.2020. Заявка № 2019108346 от 21.03.2019.

Публикации в других изданиях:

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

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

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

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

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

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

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

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

Диссертация «Получение и исследование функциональных покрытий на основе нанолуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» Сторублева Антона Вячеславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанолэлектроники, квантовых устройств, как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», для кандидатских диссертаций.

Присутствовало на заседании 10 докторов наук и 8 кандидатов наук по профилю диссертацию.

Результаты открытого голосования: «за» — 18 чел.; «против» — нет, «воздержалось» — нет

(протокол № 2 от «07» сентября 2021 г.).

Председатель заседания



Скрипаль Александр Владимирович  
д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой  
физики твердого тела

