

## Отзыв научного руководителя

на диссертационную работу Сторублева Антона Вячеславовича  
«ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
НАНОУГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ СВЧ И СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ  
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 выполнена по актуальной проблеме, по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств и посвящена совершенствованию технологии производства и характеристик источников электронов и катодно сеточных узлов устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности.

Актуальность выполненного диссертационного исследования определяется необходимостью опережающего развития активной элементной базы для обработки радиоимпульсной информации СВЧ и субтерагерцового диапазонов, направленной на создание и совершенствование систем спутниковой связи, радиолокации, радиоэлектронного противодействия и проч. 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 (металл-диэлектрик-полупроводник) 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 для передачи сигналов вместо твердого тела используется вакуум.

В выполненном исследовании диссертантом разработаны технология получения и исследованы закономерности взаимосвязей автоэмиссионных характеристик источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур с их электрофизическими свойствами. Установлено, что взаимосвязь между пороговыми напряженностями полевой эмиссии электронов в сильных импульсных электрических полях микросекундной длительности и удельными поверхностными сопротивлениями алмазографитовых композитов описывается законом Ома. Максимальные

автоэмиссионные токи, характеризующие переход от режима устойчивой эмиссии к взрывной эмиссии, зависят от поверхностного сопротивления углеродных пленочных композитов и имеют максимум при определенных его значениях. В низкоомных пленочных структурах основным механизмом разрушения катодных структур является ударная ионизация, в высокоомных – эффект Зинера.

Впервые показано, что высокая крутизна автоэмиссионных ВАХ, которая обеспечивает повышенное быстродействие полевых источников электронов в устройствах СВЧ и субтерагерцового диапазонов, реализуется в полевых источниках электронов на основе алмазграфитовых композитов с высокой поверхностной электропроводностью. Наиболее устойчивыми к взрывной эмиссии являются катодные матрицы при небольшой крутизне ВАХ.

Впервые установлен различный характер вакуумно-плазменных процессов при экстремальной полевой эмиссии в алмазграфитовых источниках электронов. В случае низкоомных алмазграфитовых структур в экстремальных режимах эксплуатации сильноточных планарно-торцевых автоэмиссионных структур основными 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, также как для сильноточных лезвийных АЭК, основным характером разрушения в экстремальных режимах эксплуатации является эрозия катодной части пленки. Эрозия обусловлено процессами взрывной эмиссии электронов с эмиссионных центров композитной пленочной структуры с возникновением факелов катодной плазмы и распылением графитовой компоненты материала катода на анод и в межэлектродный промежуток.

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

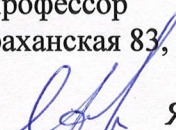
Разработан новый технологический процесс получения антиэмиссионных углеродных пленочных покрытий с повышенной работой выхода вторичных электронов и низкой скоростью термического осаждения на них активных примесных добавок МПК КСУ мощных СВЧ устройств. Показано, что плазменное фторирование графитоподобных углеродных пленок увеличивает работу выхода электронов от

исходных 4,6 эВ до 5,2 эВ после обработки в плазме CF<sub>4</sub>. Ток с управляющей сетки 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 в мощных СВЧ устройствах, различие в эмиссионных токах превышало один порядок.

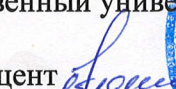
Результаты работы имеют актуальное научное и важное прикладное значение в области создания и модернизации устройств вакуумной микроэлектроники СВЧ и субтерагерцового диапазонов.

Оригинальные результаты проведенного исследования опубликованы в 16 работах, в том числе 3 статьи 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. Материалы диссертации докладывались на 8 международных и Всероссийских научных конференциях, опубликованы в сборниках их работ.

В ходе работы над диссертацией Сторублев А. В. проявил способность к кропотливой самостоятельной работе, умение реализовать сложные физические эксперименты с использованием высоковакуумного оборудования и высоковольтных источников питания, провести адекватное физическое обоснование полученных экспериментальных результатов. Оригинальность исследования и высокий уровень новизны результатов выполненной работы, всестороннее обоснование их достоверности свидетельствуют о том, что Сторублев Антон Вячеславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Профессор кафедры физики твердого тела  
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»,  
Доктор технических наук, профессор  
410012, г. Саратов, ул. Астраханская 83,  
Тел. 8-8452-511430  
E mail: [pircs@yandex.ru](mailto:pircs@yandex.ru)  Яфаров Равиль Кяшшафович

Личную подпись профессора Яфарова Равиля Кяшшафовича  
«ЗАВЕРЯЮ»

Ученый секретарь  
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»,  
кандидат химических наук, доцент  Ирина Валентиновна Федусенко

