

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность темы диссертации

В вакуумной электронике холодные (ненакаливаемые) катоды постепенно выигрывают конкуренцию у традиционно доминировавших термокатодов благодаря наличию ряда преимуществ: более высокой энергоэффективности, малого времени готовности, отсутствия необходимости в дополнительных цепях питания накала. Эти преимущества становятся все более значимыми по мере развития процесса миниатюризации устройств вакуумной электроники, включая источники излучения СВЧ и субтерагерцового диапазонов. Углеродные композиты в настоящее время считаются одним из наиболее перспективных материалов для изготовления автоэмиссионных катодов (АЭК). Однако электрофизические свойства углеродных композитных АЭК, их долговечность и поведение в зависимости от условий эксплуатации остаются недостаточно изученными. Это затрудняет разработку и практическое внедрение использующих такие катоды устройств вакуумной микроэлектроники.

Углеродные пленки могут применяться и при создании современных версий более традиционных устройств, в частности, использующих металлопористые термокатоды. Здесь они могут играть роль низкоэмиссионных покрытий для элементов катодно-сеточного узла, снижающих влияние вторичной электронной эмиссии. Для более успешного выполнения этой функции пленки графитоподобного углерода могут подвергаться вакуумно-плазменной обработке, приводящей к модификации их поверхности.

В выполненной А.В. Сторублевым диссертационной работе проведено исследование режимов эксплуатации сильноточных АЭК на основе алмазографитовых углеродных композитов. Подробно изучены экстремальные режимы эксплуатации АЭК с установлением причин нестабильности эмиссии и последующего разрушения катодной части пленки как в планарно-торцевом, так и в торцевом исполнении катода. Изучено влияние остаточной атмосферы на характеристики автоэмиссии. Отдельная глава посвящена разработке технологии получения антиэмиссионных покрытий на основе фторированных углеродных пленок, осаждаемых на

поверхность управляющей сетки катодно-сеточного узла. Полученные результаты потенциально позволяют расширить возможности приборов средней и высокой мощности СВЧ и субтерагерцового диапазонов, что делает представленную А.В. Сторублевым диссертационную работу безусловно актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена:

- изучением и анализом публикаций, посвященных существующим принципам построения микроэлектронных устройств, методам получения углеродных материалов, а также повышению долговечности СВЧ устройств на основе металлопористых термокатодов;
- адекватной постановкой задач работы, основанной на результатах анализа литературных данных;
- владением автором методами измерения автоэмиссионных характеристик катодов и параметров их долговременной стабильности и воспроизводимости, а также современными методами исследования свойств поверхности;
- корректным применением выбранных методик экспериментальных исследований.

Считаю, что содержащиеся в диссертации научные положения, выводы и рекомендации в должной мере обоснованы представленными в ней результатами проведенных автором экспериментов и расчетов.

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается:

- применением утвержденных производственных методик и серийных технологий, аттестованного измерительного оборудования, а также воспроизводимостью результатов;
- апробацией результатов работы на конференциях и семинарах. Научные результаты изложены в 16 работах (3 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 публикации в изданиях, включенных в базы Scopus или Web of Science, 7 работ в прочих изданиях, входящих в базы РИНЦ), в том числе в двух патентах РФ на изобретения.

На основании вышесказанного считаю достоверность научных результатов и выводов диссертации вполне удовлетворительной.

Новизна научных результатов

В ходе выполнения диссертационной работы автором были получены следующие новые научные результаты:

- определены технологические возможности создания сильноточных полевых источников электронов на основе композитных алмазографитовых пленочных структур, а также установлены фундаментальные факторы и процессы, ограничивающие максимальную плотность отбираемого от них тока эмиссии;
- показаны принципиальные различия автоэмиссионных параметров АЭК, выполненных на основе алмазографитовых пленочных структур с различным электрическим сопротивлением. Предложена теоретическая интерпретация наблюдаемых явлений, определены их физические механизмы;
- установлено влияние плазменного фторирования углеродных покрытий на эмиссионную способность управляющих сеток катодно-сеточных узлов.

Представленные в диссертации научные результаты имеют высокую степень новизны, могут быть интересны специалистам, работающим в области вакуумной микроэлектроники и электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники.

Практическая значимость

Считаю, что результаты работы имеют несомненную ценность для практики. Она заключается в разработке новых научно-технических и технологических решений, улучшающих эмиссионные и эксплуатационные характеристики электронной компонентной базы, включая устройства СВЧ и субтерагерцового диапазонов средней и высокой мощности.

1. Разработаны технологические методики создания полевых источников электронов, удовлетворяющих различным схмотехническим требованиям по крутизне ВАХ (скорости выхода на заданный стационарный режим эксплуатации), интервалам (критичности влияния) допустимых (неразрушающих) воздействий электрических полей, величине тока и его устойчивости к воздействию неблагоприятных внешних воздействий.
2. Показан практически неограниченный ресурс долговременной эксплуатации алмазографитовых полевых источников электронов благодаря установленной возможности восстановления эмиссионной способности автокатода со сверхвысокой плотностью тока переосаждением на него с анода распыленного ранее углеродного материала путем временного изменения полярности напряжения в межэлектродном зазоре. Это весьма важное преимущество полевых источников электронов перед

термокатодами, долговременный ресурс эксплуатации которых ограничен запасом в них активных примесных добавок.

3. Разработана технологическая методика получения углеродного антиэмиссионного покрытия катодно-сеточных узлов мощных устройств СВЧ, обеспечивающая увеличение работы выхода электронов и уменьшение скорости термического осаждения на сетки испаренных атомов активных примесей металлопористого катода. При этом замедляются изменения параметров термо- и вторичной электронной эмиссии в катодно-сеточных узлах, увеличивается КПД, долговечность и качество управления электронными потоками мощных СВЧ устройств, работающих на основе термокатодов.

Замечания

К представленной на отзыв диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В диссертации (стр. 45) говорится, что «для исследования автоэлектронной эмиссии к исследуемой диодной структуре прикладывались импульсные электрические поля с микросекундной длительностью». Очевидно, что при этом через вакуумный зазор, помимо эмиссионного, должен протекать и достаточно значительный емкостной ток, который требовалось подавить либо исключить из рассмотрения при обработке данных. К сожалению, в методической части работы отсутствует описание использованных методик импульсных электрических измерений.
2. В разделе 3.3 диссертации говорится об обнаружении свечения эмитирующих участков образцов, а в разделе 2.1 – об интенсивной катодолюминесценции пленок, отмеченной при исследованиях с использованием СЭМ. Более подробное исследование этих явлений (в частности, измерение оптических спектров), вероятно, могло бы помочь в определении структуры пленок и деталей механизма эмиссии электронов.
3. На рис.2.2 диссертации приведены спектры комбинационного рассеяния света, измеренные для нескольких образцов углеродных пленок. При их анализе наличие широкого пика вблизи частоты 1330 см^{-1} однозначно трактуется (стр. 41) как свидетельство присутствия в составе пленок алмазной фазы углерода. Вместе с тем известно, что один из характеристических пиков поликристаллического и дефектного графита (“D-пик”) имеет близкую частоту (1350 см^{-1}). Как представляется, разрешение приведенных спектров недостаточно для уверенного определения природы пика в указанной спектральной области, и вывод о присутствии алмазной фазы в составе пленок требует дополнительных обоснований.

4. В экспериментах раздела 5.1 топография поверхности пленочных покрытий изучалась с помощью атомно-силового микроскопа. Использовались зонды с паспортным значением радиуса острия 10 нм. В результате экспериментов были определены диаметры острий выступов поверхности двух покрытий, оказавшиеся равными 2-4 нм и 1-2 нм соответственно. Эти значения использовались в последующих вычислениях работы выхода покрытий. Однако использованный метод определения размеров выступов поверхности кажется недостаточно надежным в условиях, когда радиус острия зонда АСМ существенно превышает поперечные размеры выступов.
5. На стр. 87 диссертации при описании методики измерения термоэмиссии с управляющих сеток автор указывает, что «электрическая мощность, рассчитанная по формуле (5.2), находится в прямо пропорциональной зависимости от температуры сетки». Представляется, что связь мощности с температурой все же не может быть прямо пропорциональной, по крайней мере в области температур, где основным механизмом потерь тепла сеткой является излучение.
6. Работа не свободна от некоторого числа погрешностей оформления, опечаток, грамматических ошибок, случаев некорректного использования терминов и т.п. В частности, встречаются термины «потенциал работы выхода» (на стр. 47 и 81) и «работа выхода вторичных электронов» (стр. 101), не являющиеся общепринятыми.

Отмеченные недостатки не имеют принципиального характера, не снижают научную и практическую значимость полученных в работе результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Соответствие работы научной специальности.

Диссертация Сторублева Антона Вячеславовича посвящена исследованию и совершенствованию технологии производства и характеристик источников электронов и катодно-сеточных узлов электронных устройств СВЧ и субтерагерцового диапазонов. Она соответствует, согласно приказу Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118 «Об утверждении номенклатуры специальностей, по которым присуждаются ученые степени, ...», научной специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств (по направлениям п.1 – Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и

преобразователи физических величин, п. 3 - Исследование и разработка схемотехнических основ создания, конструкций и методов совершенствования изделий по п. 1, п.4 – Исследование, моделирование и разработка технологических процессов и маршрутов изготовления, методов измерения характеристик и совершенствования изделий по п. 1, п.5 – Исследование, проектирование и моделирование изделий, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения).

Диссертация удовлетворяет требованиям к публикации основных научных результатов, предусмотренным пунктами 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней». Основное содержание диссертации достаточно полно опубликовано в 16 научных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК, в 4 работах, включенных в базы SCOPUS или Web of Science, в 7 работах в прочих изданиях, входящих в РИНЦ. По ее результатам получено 2 патента на изобретения РФ. Материалы диссертации докладывались на 8 международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в сборниках их трудов и обладают достаточной степенью научной значимости.

Диссертация соответствует требованиям п. 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней». Выполненные соискателем ученой степени лично и в соавторстве работы корректно отмечены ссылками.

Заключение

Диссертационная работа Сторублева Антона Вячеславовича является законченным научным исследованием, содержит новые научные результаты и положения. Изложение представленного материала в целом логично и последовательно, текст работы характеризуется достаточной связностью и убедительностью. Выводы по итогам работы обоснованы представленным в ней научным материалом. Решение поставленных в работе научно-технических задач имеет важное прикладное значение для развития вакуумной электроники и электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание.

Считаю, что представляемая к защите диссертационная работа «Получение и исследование функциональных покрытий на основе нанoуглеродных композитов для СВЧ и субтерагерцовой микроэлектроники» соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, установленным п.п. 9-11, 13, 14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (в ред. Постановлений Правительства РФ от 30.07.2014 №723, от 21.04.2016 №335, от 02.08.2016 №748, от 29.05.2017 №650, от 28.08.2017 №1024, от

01.10.2018 №1168, с изм., внесенными Решением Верховного Суда РФ от 21.04.2014 №АКПИ14-115), а ее автор Сторублев Антон Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»



Архипов Александр Викторович

«24» октября 2022 г.

Подпись профессора Высшей инженерно-физической школы, доктора физико-математических наук Архипова Александра Викторовича

ЗАВЕРЯЮ



Служебный адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Телефон: +7(921)888-42-14

E-mail: arkhipov@rphf.spbstu.ru

Научная специальность докторской диссертации Архипова Александра Викторовича 01.04.04 – Физическая электроника