

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Смердова Ростислава Сергеевича

"Повышение разрешающей способности и снижение порога детектирования систем электронно-зондовой спектроскопии за счет разработки и применения низкопороговых автоэмиссионных катодов", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

Актуальность диссертационной работы

Задача создания источников электронов, характеризующихся низкими значениями пороговых полей, позволяющих формировать электронные пучки с узким энергетическим спектром и высокими достижимыми показателями яркости имеет важное практическое и большое научное значение. Действительно, такие источники не только позволяют повысить разрешающую способность и снизить порог детектирования систем электронно-зондовой спектроскопии, но и найдут широкое практическое применение во многих устройствах вакуумной наноэлектроники, в источниках рентгеновского излучения, а также в нанотранзисторах с вакуумным каналом. Вместе с тем, создание подобных эмиттеров неразрывно связано и с решением целого ряда фундаментальных проблем приборостроения и материаловедения, что обусловлено сложностью и многообразием процессов, определяющих условия электронной эмиссии.

Соискателем в ходе выполнения диссертационной работы эти проблемы были успешно решены. С одной стороны, в диссертационной работе Смердова Р.С. представлено теоретическое обоснование, показывающее, перспективы использования автоэмиссионных катодов с низкой дисперсией по энергии в системах электронно-зондовой спектроскопии, а с другой, проведено целенаправленное теоретическое и экспериментальное исследование процессов низкопороговой эмиссии из углеродных наноматериалов, результатом которого явилось создание автоэмиссионного низкопорогового катода из нового наноматериала на основе пористого кремния, функционализированного дopedированными серебром углеродными структурами на базе фуллерена C₆₀. Таким образом, **важность и актуальность диссертационной работы Смердова Р.С. и проводимых в рамках этой работы научных исследований не вызывает сомнения.**

Структура и основное содержание диссертации

Диссертационная работа Смердова Р.С. состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 135 наименований. Работа изложена на 219 страницах, содержит 41 рисунок, 6 таблиц и 1 приложение.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и определены задачи, которые необходимо решить для ее достижения. Раскрыты теоретическая и практическая значимость проводимого исследования. Первая глава является обзором литературы по теме диссертационной работы. Во второй главе рассматриваются особенности формирования временной и энергетической разрешающей способности спектроскопии характеристических потерь энергии электронов. Представлено теоретическое обоснование увеличения энергетического разрешения спектроскопической системы при использовании низкопороговых катодов нового типа. В третьей главе приведена теоретическая база для

1
ОТЗЫВ

ВХ. № 9-112 от 11.05.2022
АУ УС

разработки и описания процесса эмиссии электронов из низкопороговых автоэмиссионных катодов. В четвертой главе описана процедура синтеза композиционного материала для прототипов низкопороговых катодов. Представлены результаты исследования их структуры и свойств. В заключении диссертантом сформулированы основные научные результаты работы. В приложение вынесено теоретическое описание процессов неупругого рассеяния электронов на внешних и внутренних оболочках атомов.

Основные научные результаты

При анализе диссертационной работы Смердова Р.С. можно выделить следующие принципиально важные научные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных исследований:

1. Методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и растровой электронной микроскопии проведен анализ структуры и морфологии поверхности материалов, использованных для сознания низкопороговых полевых катодов на базе пористого кремния; на основании результатов анализа предложена модель эффекта низкопороговой эмиссии электронов из композиционных структур, позволяющая на физическом уровне описывать процесс выхода электронов из целого ряда материалов с дефектами (в том числе, аморфных).

2. Выполненный с использованием модели квантового ограничения анализ спектров комбинационного рассеяния композиционных материалов, использованных для создания низкопорогового катода, позволяет связать модификацию кристаллической структуры кремниевой матрицы в процессе функционализации с эффектом деформации, сопровождающимся образованием нанокристаллитов в структуре материала в результате осаждения наночастиц в порах на поверхности матрицы.

3. Разработана физическая модель связи регистрируемых сигналов и параметров эффекта низкопороговой эмиссии из углеродных материалов с дефектами кристаллической структуры, положенная в основу при создании низкопороговых полевых катодов.

4. Для систем спектроскопии характеристических потерь энергии электронов показана возможность увеличения энергетической и временной разрешающей способности, а также снижения порога детектирования минимальных атомных долей химических элементов в следовых количествах на 20 %, 17 % и 9 % соответственно за счет применения разработанных низкопороговых катодов в качестве источников электронов.

5. Разработана методика анализа эмиссионных характеристик низкопороговых катодов с использованием графических структур типа Фаулера-Нордгейма.

Представленные в диссертации результаты являются новыми, физически обоснованными и достоверными. Все результаты работы получены автором впервые. Основной личный вклад автора не вызывает сомнений.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются большим объемом накопленных экспериментальных данных, полученных с использованием современного оборудования, их корректной обработкой, а также сопоставлением результатов экспериментов с расчетными результатами, полученными на модельных структурах с использованием апробированных методов расчета, а также, где это было возможно, сопоставлением с результатами исследований отечественных и зарубежных авторов.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования были опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, а 14 статей в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus, WoS). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы докладывались на 25 конференциях (из них 19 международных и 6 всероссийских).

Перечень работ, опубликованных в виде статей и тезисов докладов конференций, позволяет сделать вывод, что автору удалось выполнить весьма обстоятельное и обширное исследование, в рамках которого получен целый ряд новых научных результатов, вполне отвечающих сформулированной автором цели и поставленным задачам.

Замечания по диссертационной работе в целом

Следует отметить высокий научный уровень, как теоретической, так и экспериментальной компонент исследований, представленных в диссертации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. В целом диссертация производит благоприятное впечатление. Вместе с тем при знакомстве с диссертационной работой возникает ряд замечаний:

1. В настоящее время известны несколько теорий полевой эмиссии из углеродных наноструктур, однако соискателем почему то безоговорочно используется только одна из них — теория полевой эмиссии, основанная на идеях Андерсона о структуре неупорядоченных твердых тел и представлениях Хаббарда о существовании двухзарядовых состояний с отрицательной корреляцией энергией, которая в настоящее время является предметом оживленной научной дискуссии.

2. Соискателем предложена энергетическая диаграмма поверхности прототипа полевого катода на основе слоя пористого кремния модифицированного допированными серебром углеродными структурами на базе фуллерена C_{60} . Из данной схемы следует, что используется кремний p -типа. Неясно почему выбран кремний p -типа, а не n -типа, использование которого обеспечивало бы снижение высоты потенциального барьера, контролирующего инжекционные процессы, на величину близкую к ширине запрещенной зоны кремния.

3. Известно, что загрязнения, на поверхности катодов даже в виде нескольких монослоев атомов, способны оказать существенное влияние на их эмиссионные свойства. Очистка поверхности катода возможна, например, за счет их прогрева в условиях высокого вакуума. Поэтому неясно можно ли создать стабильные воспроизводимые эмиттеры электронов, используя золь-гель технологию.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Общее заключение

Смердовым Р.С. выполнено серьезное научное исследование, в результате которого был разработан новый эмиссионный материал на основе пористого кремния, функционализированного допированными серебром углеродными структурами на базе фуллерена C_{60} , что позволило создать прототип низкопорогового полевого катода,

позволяющего решать задачу увеличения разрешающей способности систем спектроскопии характеристических потерь энергии электронов при обеспечении стабильной работы для пороговых значений напряженности поля на 3 порядка ниже, чем в существующих устройствах.

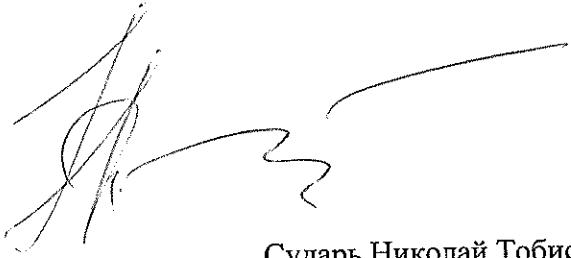
Полученные результаты являются новыми, имеют фундаментальное и практическое значение. Они могут быть использованы при выполнении теоретических и прикладных исследований в ряде научных, производственных и образовательных учреждений России.

Диссертация «Повышение разрешающей способности и снижение порога детектирования систем электронно-зондовой спектроскопии за счет разработки и применения низкопороговых автоэмиссионных катодов», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», утвержденного приказом ректора Горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Смердов Ростислав Сергеевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

Официальный оппонент

Профессор

Высшей школы электроники
и микросистемной техники
Санкт-Петербургского политехнического
университета Петра Великого,
доцент, доктор ф.-м.н.



Сударь Николай Тобисович

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251
тел. +7(812) 552 76 21
e-mail: sudar_nt@spbstu.ru

