

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ 212.224.14  
ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА (ДОКТОРА) НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 24.05.2022 г. № 16

О присуждении **Смердову Ростиславу Сергеевичу**, гражданину РФ,  
ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение разрешающей способности и снижение порога детектирования систем электронно-зондовой спектроскопии за счет разработки и применения низкопороговых автоэмиссионных катодов» по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий принята к защите 17.03.2022 г., (протокол заседания № 8 диссертационным советом ГУ 212.224.14 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Горного университета о создании диссертационного совета от 23.09.2019 № 1232 адм с изменениями от 22.12.2020 № 1903 адм, от 06.04.2021 № 662 адм, от 12.07.2021 № 1383 адм, от 09.11.2021 № 2312 адм.

Соискатель, **Смердов Ростислав Сергеевич**, 21 сентября 1993 года рождения, в 2016 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи с присвоением квалификации магистра.

В 2020 году соискатель освоил программу подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-

Петербургский горный университет» Минобрнауки России. Диплом об окончании аспирантуры получен 03.07.2020 г.

Диссертация выполнена на кафедре общей и технической физики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» Минобрнауки России.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор **Мустафаев Александр Сеит-Умерович**, заведующий кафедрой общей и технической физики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» Минобрнауки России.

Официальные оппоненты:

**Сударь Николай Тобисович** – доктор физико-математических наук, доцент, профессор Высшей школы электроники и микросистемной техники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;

**Пронин Игорь Александрович** – доктор технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой «Нано- и микроэлектроника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет»; дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Ioffe Institute), г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном **Теруковым Евгением Ивановичем** доктором технических наук, профессором, заведующим лабораторией физико-химических свойств полупроводников и **Анкудиновым Александром Витальевичем** доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником, секретарем заседания, и утвержденном

**Брунковым Павлом Николаевичем** доктором физико-математических наук, заместителем директора, указала, что результаты проведенных исследований структуры, свойств и характеристик разработанных прототипов низкопороговых полевых катодов, а также выполненный теоретический, расчетный и экспериментальный анализ целесообразности их применения для увеличения разрешающей способности и снижения порога детектирования следовых концентраций химических элементов систем спектроскопии характеристических потерь энергии электронов могут быть использованы при создании новых приборов и систем, позволяющих решать задачи диагностики материалов и структур на наноуровне.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 16 работ, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 14 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Общий объем – 6,75 печатных листов, в том числе 3,81 печатных листов - соискателя.

#### **Публикации в изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки РФ:**

**1. Смердов, Р. С.** Заграждающий фильтр видимого и ближнего ультрафиолетового диапазона для флуоресцентного микроскопа на основе явления плазмонного резонанса / Р. С. Смердов, В. В. Лобода, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // 2016. – Научно-технические ведомости Санкт-петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление, № 3 (247). – С. 13-22.

*Соискателем выполнены: разработка прототипа эмиссионного материала на основе пористой полупроводниковой матрицы,*

*функционализированной наномассивом частиц серебра; измерение и анализ электронно-абсорбционных спектров прототипов.*

**2. Смердов, Р. С.** Магнитные и плазмонные композиционные наноструктуры для реализации оптических фильтров в системах контроля и диагностики веществ и материалов / Р. С. Смердов, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников, А. С. Мустафаев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. – Т. 24, № 3. – С. 80–96.

*Соискателем выполнены: измерение и анализ электронно-абсорбционных спектров прототипов; оценка постоянной поглощения дипольной плазменной моды частицы на поглощающую матрицу наночастиц по теории У. Крайбига; оценка размеров квантовых (квантово-размерных) кластеров серебра путем применения упрощенной сферической модели.*

**Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:**

**3. Smerdov, R. S.** Spectroscopic properties of  $\gamma$ -irradiated FemOn–SiO<sub>2</sub> composite nanoparticles / R. S. Smerdov, T. V. Bocharova, V. S. Levitsky, K. G. Gareev, V. A. Moshnikov, E. I. Terukov // 2016. – Physics of the Solid State. – Vol. 58. – P.919-923.

*Соискателем выполнены: исследования спектров оптического поглощения композиционных наночастиц, исследования рамановских спектров композиционных слоев наночастиц, исследования спектров ЭПР слоев композиционных наночастиц.*

**4. Smerdov, R. S.** Spectroscopic properties of superparamagnetic FemOn - SiO<sub>2</sub> nanoparticle colloidal solutions / R. S. Smerdov, T. V. Bocharova, K. G. Gareev. – DOI 10.1088/1742-6596/769/1/012037 // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 769. – № 1. – P. 012037-1–012037-4.

*Соискателем проведен анализ спектроскопических свойств прототипа эмиссионного материала с использованием теории поглощения Г. Ми.*

**5. Smerdov, R. S.** The characterisation of nanostructured porous silicon/silver layers via Raman spectroscopy / R. S. Smerdov, Yu. M. Spivak, V. S.

Levitsky, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1088/1742-6596/1038/1/012064 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1038. – № 1. – P. 012064-1–012064-4.

*Соискателем проведен анализ сигналов спектроскопии комбинационного рассеяния, зарегистрированных при исследовании композиционного эмиссионного наноматериала на основе пористого кремния.*

**6. Smerdov, R. S.** Porous silicon and graphene-based composite nanostructures for plasma energy systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov // Europhysics conference abstracts: 45 EPS Conference on Plasma Physics. – 2018. Vol. 45A – P. 921–924.

*Соискателем выполнено обоснование применения композиционных наноструктур на основе пористого кремния (ПК) и графена для создания PETE-электродов и плазменных систем термоэмиссионного преобразования энергии, проведены анализ и интерпретация рамановских спектров ПК/Ag.*

**7. Smerdov, R. S.** Porous silicon and graphene-based nanostructures for novel solar energy systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1088/1742-6596/1135/1/012038 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1135. – № 1. – P. 012038-1–012038-5.

*Соискателем выполнены исследования структуры поверхности и свойств пористых эмиссионных материалов и прототипов приборов для преобразования энергии на их основе, анализ возможности получения материалов с низкой работой выхода за счет функционализации и создания структурированных композиционных материалов.*

**8. Smerdov, R. S.** Porous Silicon and Graphene Composite Materials for Novel Nanoenergetic Systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov, V. S. Soukhomlinov. – DOI 10.1109/EExPolytech.2018.8564386 // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech (St. Petersburg,

Russia, 22-23 Oct. 2018) / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – Piscataway, NJ: IEEE, 2018. – P. 152-155.

*Соискателем выполнено теоретическое обоснование применения полученных композиционных наноструктурированных материалов для создания электродов (в том числе для систем фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии).*

**9. Smerdov, R. S.** Nanostructured porous silicon and graphene-based materials for PETE electrode synthesis / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, V. S. Soukhomlinov, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1109/EIConRus.2019.8657196 // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus (St. Petersburg, Russia, 28-31 Jan. 2019) / Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. – Piscataway, NJ: IEEE, 2019. – P. 786–790.

*Соискателем проведен анализ оптических характеристик композиционных слоев на базе пористого кремния для реализации перспективных катодов с возможностью заранее задавать требуемую ширину запрещенной зоны в диапазоне от 1 до 3 эВ.*

**10. Smerdov, R. S.** Graphene and porous silicon structures for novel nanoelectronic systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov // Proceedings of the international forum-contest of young researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2018». - CRC Press/Balkema, – 2019. – P. 439-447. – ISBN 978-036702743-8.

*Соискателем выполнено исследование структуры эмиссионных материалов на основе пористого кремния для синтеза PETE-электродов и термоэмиссионных преобразователей энергии методом спектроскопии усиленного поверхностью рамановского рассеяния.*

**11. Smerdov, R. S.** Composite Porous Silicon Materials for Emission Electrode Synthesis / R. S. Smerdov. – DOI 10.1109/EEExPolytech.2019.8906841 // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics

(EExPolytech) (St. Petersburg, Russia, 17-18 Oct. 2019) / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – Piscataway, NJ: IEEE, 2019. – P. 201–204.

*Соискателем проведено теоретическое обоснование процесса полевой эмиссии электронов из наноразмерных и композиционных структур.*

**12 Smerdov, R. S.** Composite materials for next generation plasma energy systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, A. Y. Grabovskiy, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1088/1742-6596/1328/1/012028 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1328. – № 1. – P. 012028-1–012028-5.

*Соискателем проведено расчетно-теоретическое обоснование управления структурой и свойствами эмиссионной матрицы на базе пористого полупроводникового материала за счет модификации параметров синтеза с использованием теории квантовой локализации.*

**13. Smerdov, R. S.** Nanostructures based on functionalized porous silicon for promising solar energy systems / R. S. Smerdov, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov. – DOI 10.1088/1742-6596/1400/5/055014 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1400, № 5. – P. 055014-1–055014-6.

*Соискателем выполнено исследование механизма функционализации фрактальными агломератами серебра и анализ свойств исходной матрицы из пористого кремния с высоким аспектным соотношением методом электронно-абсорбционной спектроскопии.*

**14. Smerdov, R. S.** Functionalized nanostructured materials for novel plasma energy systems / R. S. Smerdov, A. S. Mustafaev, Yu. M. Spivak, V. A. Moshnikov // Proceedings of the international forum-contest of young researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019». – CRC Press/Balkema. – 2019. – P. 434-441. ISBN 9781003014577.

*Соискателем проведено обоснование применения функционализированных наноструктурированных углеродных материалов и композиционных материалов на основе пористого кремния для создания эмиссионных электродов, выполнено исследование эффекта локализованного*

*поверхностного плазмонного резонанса с использованием метода электронно-абсорбционной спектроскопии.*

**15. Smerdov, R. S.** The Investigation of a Novel Field Emission Cathode Prototype for Electron Microscopy Methods of Monitoring the Environment, Substances, Materials and Products / R. S. Smerdov, Yu. M. Spivak, I. S. Bizyaev. – DOI 10.1109/EExPolytech50912.2020.9243983 // 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech) (St. Petersburg, Russia, 15-16 Oct. 2020) / Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – Piscataway, NJ: IEEE, 2020. – P. 212–215.

*Соискателем проведено теоретическое обоснование увеличения разрешающей способности методов электронно-зондовой микроскопии и анализ эмиссионных характеристик разработанного материала на основе функционализированной углеродными наноструктурами матрицы из пористого кремния с высоким аспектным соотношением.*

**16. Smerdov, R. S.** Advances in Novel Low-Macroscopic Field Emission Electrode Design Based on Fullerene-Doped Porous Silicon / R. Smerdov, Y. Spivak, I. Bizyaev, P. Somov, V. Gerasimov, A. Mustafaev, V. Moshnikov. – DOI 10.3390/electronics1001004 // Electronics (Switzerland). – 2021. – Vol. 10. – P. 1–13.

*Соискателем выполнены разработка и синтез низкороговых катодов на основе функционализированной углеродными наноструктурами матрицы из пористого кремния с высоким аспектным соотношением, анализ результатов исследований структуры поверхности катодов SEM и EDS – методами, регистрация и анализ эмиссионных характеристики эмиттеров, разработка новой физической модели низкороговой эмиссии.*

**Свидетельство:**

**17.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018612839. Российская Федерация. Исследование энергетических закономерностей работы источников тока / Чернобаи В. И., Фицак В. В., Смердов Р. С.; правообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный



университет». — № 2018610192; заявл. 09.01.2018; зарегистр. 01.03.2018; опубл. 01.03.2018, Бюл. № 3. – 1.

Апробация работы проведена на научно-практических мероприятиях с докладами, где обсуждались положения и результаты исследований диссертационной работы:

1. Всероссийская научная конференция современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса (2018), 27–28 ноября 2018, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, тема доклада: «Наноматериалы на основе графена и пористого кремния для перспективных систем солнечной энергетики»

2. Международная конференция «IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics» (EEhPolytech-2018), 22–23 октября 2018, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, тема доклада: «Porous silicon and grapheme composite materials for novel nanoenergetic systems (Композиционные материалы пористого кремния и графена для новых наноэнергетических систем)»

3. Международная конференция «IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics» (EEhPolytech-2019), 17–18 октября 2019, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, тема доклада: «Composite porous silicon materials for emission electrode synthesis (Композиционные материалы пористого кремния для синтеза эмиссионных электродов)»

4. Международная конференция «IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics» (EEhPolytech-2020), 15–16 октября 2020, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, тема доклада: «The investigation of a novel field emission cathode prototype for electron microscopy methods of monitoring the environment, substances, materials and products (Исследование нового прототипа автоэмиссионного катода для электронно-микроскопических методов контроля окружающей среды, веществ, материалов и продуктов)»

5. Международная конференция "Аморфные и микрокристаллические полупроводники (AMS-2018), 19-21 ноября 2018, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, тема доклада: «Композиционные наноструктуры на основе графена и пористого кремния для систем плазменной энергетики нового поколения»

6. Международная конференция «IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering» (ElConRus-2019), 28–30 января 2019, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, тема доклада: «Nanostructured porous silicon and grapheme-based materials for PETE electrode synthesis (Наноструктурированный пористый кремний и материалы на основе графема для синтеза PETE электродов)»

7. Научная конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2019), 18–23 ноября 2019, СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, тема доклада: «Композиционные материалы на основе пористого кремния для синтеза эмиссионных электродов»

В диссертации **Смердова Ростислава Сергеевича** отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: заведующего кафедрой «Микро- и наноэлектроника» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», д.ф.-м.н., доцента **В.Г. Литвинова**; доцента Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», д.ф.-м.н. **А.В. Архипова**; доцента высшей школы электроники и микросистемной техники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», к.ф.-м.н., доцента **В.М. Капраловой**; декана факультета электроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», д.ф.-м.н., профессора **А.В. Соломонова**; профессора кафедры физики ФГКВООУ ВО «Военная орденов Жукова и

Ленина Краснознамённая академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, д.т.н., доцента **Н.С. Пщелко**; заведующего кафедрой оптики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», д.ф.-м.н., профессора **Н.А. Тимофеева**; главного научного сотрудника лаборатории неорганического синтеза ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт Химии Силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН), д.х.н., профессора **О.А. Шиловой**; ведущего научного сотрудника циклотронной лаборатории, д.ф.-м.н., доцента **Е. О. Попова** и зам. руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук д.ф.-м.н., в.н.с., **В. И. Кузнецова**; заведующего кафедрой физики ФГКВУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознамённая академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации, д.ф.-м.н., профессора **С.Д. Ханина**; генерального директора Общества с ограниченной ответственностью "ИНТРО-МИКРО", к.ф.-м.н. **А.Б. Цыганова**.

В отзывах дана положительная оценка выполненного исследования, отмечена актуальность темы диссертационной работы, степень проработки проблемы, высокий фундаментальный и технический уровень предложенных решений и рекомендаций, а также практическая применимость результатов для решения актуальных задач совершенствования характеристик приборной базы электронно-зондовых методов исследования и нанодиагностики, однако имеется ряд вопросов и замечаний:

1. Целесообразно было бы кратко включить в рассмотрение представленные непосредственно в диссертации, но, к сожалению, не отраженные в автореферате результаты исследования устойчивости композиционных материалов, использованных при синтезе прототипов электродов, к воздействию жесткого гамма-излучения, поскольку эти данные представляют интерес с точки зрения разработки высокоэффективных

термоэмиссионных преобразователей при создании источников энергии для космических аппаратов. (к.ф.-м.н. **В.М. Капралова**).

2. Не вполне понятно, почему автором был сделан акцент исключительно на аналитическом методе спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (EELS). С точки зрения практического применения электронно-зондовых систем следовало привести расширенный сравнительный анализ наиболее перспективных с точки зрения поставленных задач анализа и диагностики наноструктурированных материалов методов (например, ELNES, EDX и т.д.). (д.ф.-м.н. **А.В. Соломонов**).

3. В рамках диссертационной работы автором были проведены исследования структуры и свойств ряда разработанных перспективных прототипов катодов, в том числе полученных с использованием технологии динамически усиленного осаждения, электрохимического осаждения, а также золь-гель процесса. На мой взгляд, в рамках дальнейших исследований автору следует уделить больше внимания анализу эмиссионных характеристик и перспективе применения прототипа, полученного с использованием золь-гель процесса, в связи с отличительными особенностями данной технологии, позволяющими, например, вводить сразу несколько функционализирующих компонентов в матрицу за одну стадию. (д.ф.-м.н. **А.В. Соломонов**).

4. Хотя автореферат работы содержит описание технологии синтеза прототипа низкопорогового автоэмиссионного катода с узким энергетическим спектром, на мой взгляд, автору следовало представить использованную методику более подробно (в том числе, используя результаты анализа поверхности прототипа методом электронно-абсорбционной спектроскопии, содержащиеся в тексте диссертации). (д.т.н. **Н.С. Пщелко**)

5. Из текста диссертации не до конца ясно, что автор подразумевает под квантовыми кластерами серебра. В рамках дальнейших исследований автору рекомендуется представить более подробное описание данных

объектов и привести данные, характеризующие их физические параметры (помимо размера). (д.т.н. **Н.С. Пщелко**).

6. На стр.11 автореферата его автор указывает, что для наблюдения холодной полевой эмиссии используются электрические поля с напряженностями вплоть до  $10^{10}$  В/м. Однако эти значения соизмеримы с внутриатомными полями и едва ли реализуемы как искусственно создаваемые в технических устройствах. Известны ли материалы с электрической прочностью  $10^{10}$  В/м? (д.т.н. **Н.С. Пщелко**).

7. Из автореферата не ясно, насколько стабильны характеристики низкопороговых катодов, изготовленных из нанокompозитных структур на основе пористого кремния. (д.ф.-м.н. **В.Г. Литвинов**; д.т.н. **Н.С. Пщелко**).

8. Почему в качестве активного эмиссионного слоя на поверхности матрицы из пористого кремния с высоким аспектным соотношением автором было выбрано именно покрытие из допированного фуллерена  $C_{60}$  (а не другие углеродные материалы, например, слой графена или аморфного углерода)? (д.ф.-м.н. **Н.А. Тимофеев**; д.х.н. **О.А. Шилова**)

9. В работе не приводятся данные по исследованию эмиссионных характеристик покрытия из чистого (нелегированного) фуллерена  $C_{60}$ . Будут ли установленные параметры низкопороговой эмиссии наблюдаться и для подобного прототипа? (д.ф.-м.н. **Н.А. Тимофеев**)

10. Из анализа представленных автором РЭМ – снимков поверхности и скола прототипа катода следует, что было обеспечено покрытие развитой структуры как микро-, так и мезопор кремниевой матрицы активным эмиссионным слоем. За счет чего удалось решить эту задачу? (д.ф.-м.н. **Н.А. Тимофеев**)

11. По мнению автора отзыва, фраза «Применение разработанного низкопорогового катода из нового наноматериала на основе пористого кремния, функционализированного допированными серебром углеродными структурами на базе фуллерена  $C_{60}$ » могла бы быть написана без слова «функционализированного». (д.ф.-м.н. **Н.А. Тимофеев**)

12. В автореферате отсутствуют результаты анализа данных, полученных автором при исследовании композиционных материалов методом ЭПР, хотя в диссертации эти исследования представлены. (д.х.н. **О.А. Шилова**).

14. Автор активно ссылается на известную работу Р. Форбса 2001 года, в которой речь идёт о низких макроскопических полях для новых для того времени наноэмиттеров, по сравнению с традиционными металлическими острыми эмиттерами. В этой связи не понятно, о какой низкопороговой характеристике идет речь в диссертации? Для доказательства работы эмиттера в режиме действительно низких локальных полей следует использовать тест на полевою эмиссию Форбса (2013 г.). (д.ф.-м.н., **Е.О. Попов**).

14. Что означает достигнутый эмиссионный ток для катода на базе углеродных нанотрубок (Таблица 2 автореферата)? Не являются ли опечаткой приведенные для CNT значения работы выхода?. (д.ф.-м.н., **Е.О. Попов**).

15. Методом электронно-абсорбционной спектроскопии автором был успешно определен диаметр частиц композиционной структуры ПК-Ag 0.7 нм. Какова площадь эмиссии для Рис.5, получаемой в ходе применения стандартной обработки ВАХ в полулогарифмических координатах? Насколько обоснованным является использование в работе значение FEF, равное 100? (д.ф.-м.н., **Е.О. Попов**).

16. Из текста автореферата неясно, как именно легирование серебром исходных функционализирующих наноструктур на базе фуллерена C<sub>60</sub> влияет на эмиссионные характеристики прототипа катода. (к.ф.-м.н., **А.Б. Цыганов**).

17. Несмотря на то, что автором в качестве предмета исследования был избран один из самых перспективных методов исследования высокого разрешения – EELS – остается непонятным, почему в тексте автореферата, по крайней мере кратко, не отражены основные рабочие и метрологические

параметры систем, реализующих другие электронно-зондовые методы исследования (в том числе, спектроскопию вторичных электронов)? (к.ф.-м.н., **А.Б. Цыганов**).

18. Автор отзыва считает, что в рамках проведения анализа существующих и перспективных методов исследования элементного и фазового состава наноматериалов автору следовало уделить больше внимания сравнению EELS, выбранного в качестве предмета исследования, с альтернативными техниками с точки зрения достижимых параметров и фундаментальных ограничений. (д.ф.-м.н. **С.Д. Ханин**).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетенцией в данной области.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый автоэмиссионный низкопороговый катод из функционализированной углеродными наноструктурами пористой матрицы с высоким аспектным соотношением, не уступающий перспективным разработкам на базе аморфного углерода и углеродных нанотрубок по значениям пороговой напряженности поля, достигнутому току эмиссии и значениям высоты потенциального барьера для электронов.

**разработана** новая физическая модель явления низкопороговой эмиссии, описывающая связь процессов, происходящих в предложенном наноструктурированном низкопороговом катоде, с регистрируемыми сигналами автоэлектронной эмиссии.

**предложен** метод преодоления фундаментальных ограничений систем спектроскопии характеристических потерь (EELS) за счет создания и применения источников электронов с узкой функцией распределения по энергии.

**доказана** перспективность использования низковольтных катодов для увеличения разрешающей способности и снижения порога детектирования

электронно-зондовых систем, реализующих метод спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

**доказан**

- потенциал увеличения энергетического разрешения EELS на 20 % по сравнению с классическими установками, использующими пушки на базе холодных катодов из золота (Au) в качестве источников электронов.

- потенциал увеличения временного разрешения EELS на 17 % по сравнению с перспективными системами с источниками электронов на базе углеродных нанотрубок.

- потенциал снижения порога детектирования следовых концентраций химических элементов на 9% за счет применения низкопорогового катода нового типа, характеризующегося более высокой плотностью эмиссионного тока при сравнимых или меньших значениях напряжения, чем современные и перспективные аналоги на базе углеродных нанотрубок в качестве источников электронов.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** принципиальная возможность преодоления фундаментального ограничения дальнейшего роста характеристик EELS систем за счет разработки и использования катодов с узким энергетическим спектром.

применительно к проблематике диссертации результативно **использованы** методы энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рамановской спектроскопии, электронного парамагнитного резонанса и растровой электронной микроскопии для анализа структуры, морфологии и свойств поверхности разработанных новых материалов, использованных при создании низкопороговых полевых катодов на базе пористого кремния; предложенная на основании результатов проведенного анализа модель явления низкопороговой эмиссии электронов позволяет на физическом уровне описывать процесс выхода электронов для широкого ряда



углеродных материалов с различными отклонениями от структуры идеального монокристалла (в том числе аморфных).

**изложена** идея использования низковольтных катодов в качестве источников носителей заряда для совершенствования систем анализа элементного и фазового состава поверхностей материалов и изделий в наномасштабе, реализующих метод спектроскопии характеристических потерь энергии электронов.

**раскрыты** основные недостатки существующих решений, базирующихся на применении монохроматоров для формирования монодисперсного электронного пучка и использовании детекторов с узким энергетическим окном, заключающиеся в снижении характеристик EELS, в том числе пространственного разрешения и яркости электронного пучка.

**изучены** особенности структуры и свойств разработанных прототипов катодов; с использованием модели квантового ограничения выполнен анализ спектров комбинационного рассеяния модифицированных подложек с высоким аспектным соотношением, использованных при создании низкопороговых катодов.

**проведена модернизация** существующих моделей эмиссии электронов с поверхности кристаллических материалов для их обобщения с целью анализа и получения новых результатов при исследовании эмиссионных характеристик материалов с дефектами (в том числе аморфных) и приборов, выполненных на их основе.

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

**разработан и внедрен** новый автоэмиссионный низкопороговый «холодный» катод, характеризующийся низкими значениями пороговой напряженности поля ( $\approx 2$  В/мкм) и высоты потенциального барьера для электронов ( $\approx 0,4$  эВ), а также высокой достигнутой плотностью тока эмиссии (до  $6$  мА/см<sup>2</sup>).

**определены** перспективы дальнейших исследований в области разработки, синтеза, диагностики и внедрения новых композиционных наноматериалов с целью создания приборов на их основе для применения в управляемых эмиссионных системах, обладающих набором уникальных параметров, использование которых позволит решить ряд задач по анализу физических эффектов на поверхности электродов для разработки новых технологий преобразования энергии, а применение углеродных наноструктур с низкой работой выхода представляет значительный интерес с точки зрения многочисленных приложений – от устройств эмиссионной электроники до систем водородной энергетики.

**создана** методика анализа полевых катодов с использованием графических структур типа Фаулера-Нордгейма, которая, несмотря на ряд недостатков, в том числе сложность анализа эмиссионных характеристик полупроводниковых, наноразмерных и композиционных материалов, является эффективной, поскольку позволяет с достаточной точностью установить связь регистрируемых сигналов автоэлектронной эмиссии с основополагающими параметрами (в том числе высотой потенциального барьера для электронов), характеризующими процессы и явления, происходящие в разработанных автором новых низкопороговых полевых катодах, а также проводить их сравнение с используемыми на текущий момент современными и перспективными устройствами.

**представлены** рекомендации по дальнейшему совершенствованию низкопороговых катодов с целью их применения для улучшения характеристик актуальных систем электронно-зондовой микро- и спектроскопии.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** результаты получены на современном оборудовании, с применением актуальных техник и методик исследования, характеризуются высокой воспроизводимостью и повторяемостью для всех

предложенных прототипов источников носителей заряда с узким энергетическим спектром.

**теория** построена на известных как в России, так и за рубежом фундаментальных представлениях о процессе неупругого рассеяния электронов на внешних и внутренних атомных оболочках, сечении рассеяния, а также структуре монокристаллических и аморфных тел. Предложенная и использованная в работе теория согласуется с независимо опубликованными экспериментальными данными по смежным с темой диссертации отраслям.

**идея базируется** на анализе большого объема имеющихся в научной литературе данных по исследованиям в области совершенствования характеристик электронно-зондовых систем за счет применения существующих и разработки новых приборов (в частности, датчиков прямого детектирования электронов), а также обобщении передового опыта в области разработки катодов для систем как вакуумной, так и твердотельной электроники.

**использованы** данные о зависимости структуры подложки из пористого кремния от условий и параметров синтеза, полученные ранее в ходе совместных исследований с ведущими российскими научными группами (СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбПУ), для оптимизации процедуры разработки и создания матрицы прототипа катода с высоким аспектным соотношением.

**установлено** качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых отечественных и зарубежных источниках по разработке перспективных катодов как для зондовых систем, так и для энергетических и детектирующих устройств, в тех случаях, когда такое сравнение является обоснованным и целесообразным.

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации в контексте поставленных и решенных в диссертации задач.

**Личный вклад соискателя состоит** в выборе тематики исследования, постановке задач конкретных работ, их планировании и осуществлении. Основная часть приводимых результатов была получена автором лично, либо совместно с соавторами публикаций. Личный вклад соискателя также состоит в обобщении и обработке полученных экспериментальных данных (в том числе эмиссионных характеристик катодов), проведении исследований катодных материалов методами электронно-абсорбционной спектроскопии, рамановской спектроскопии, электронного парамагнитного резонанса), формулировке основных научных положений и выводов, подготовке текстов научных публикаций и диссертации. При непосредственном участии автора был произведен синтез новых композиционных материалов, использованных для создания прототипов низкопороговых катодов. Соискателем была разработана новая информационная модель явления низкопороговой эмиссии, основанная на теории двухэлектронных локализованных состояний с отрицательной корреляционной энергией. Основные результаты, положения и рекомендации, представленные в диссертационной работе, изложены в научных публикациях и представлены на профильных конференциях.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель **Смердов Р.С.** ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию.

На заседании 24 мая 2022 года диссертационный совет принял решение присудить **Смердову Р.С.** ученую степень кандидата технических наук за решение научной задачи увеличения разрешающей способности и снижения порога детектирования систем спектроскопии характеристических потерь энергии электронов за счет преодоления фундаментальных ограничений путем разработки и применения новых низкопороговых катодов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 9 докторов наук (по научной специальности

рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 13 (2 не участвовали в голосовании), против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель  
диссертационного совета



Шпенст Вадим Анатольевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Коптева Александра Владимировна

24.05.2022 г.