



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)»

(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной деятельности
федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
Санкт-Петербургский
государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И.
Ульянова (Ленина), д.т.н.

А.А. Семенов

« _____ » _____ 2026 г.

О Т З Ы В

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.

Ульянова (Ленина) диссертационную работу

Ерминой Анны Андреевны

«СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА»,

представленной на соискание учёной степени кандидата

физико-математических наук по специальности

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа А.А. Ерминой, посвящённая исследованию структурных, оптических и функциональных свойств композитных систем на основе монокристаллического кремния и наночастиц серебра, выполнена в рамках актуального и интенсивно развивающегося направления современной физики конденсированного состояния – наноплазмоники и полупроводниковой технологии на кремнии.

Актуальность темы исследования не вызывает сомнений. В последние годы особое внимание уделяется разработке плазмонных и гибридных композитных структур, совмещающих локализованные

плазмонные резонансы наночастиц благородных металлов с возможностями современной кремниевой технологии. Подобные системы представляют значительный интерес как для фундаментальных исследований – управление локализованными плазмонными резонансами, усиление ближнего электромагнитного поля и изучение связи морфологии с оптическим откликом, так и для практических приложений в нелинейной оптике, фотовольтаике, фотонике и сенсорике, в частности, спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света (ГКР). Особенно перспективным является использование серебряных наночастиц благодаря их низким оптическим потерям в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, что обеспечивает высокую эффективность локального усиления электромагнитного поля.

Особую значимость и уникальность работе придаёт разработка воспроизводимого метода формирования наночастиц серебра контролируемой формы, внедрённых в приповерхностный слой кремния, что открывает новые возможности для создания функциональных ГКР-подложек, поскольку полупроводниковая поверхность стабилизирует наночастицы серебра и препятствует их агломерации, что важно для получения подложек с воспроизводимым и пространственно однородным сигналом ГКР. В этой связи диссертационная работа А.А. Ерминой является своевременной, научно обоснованной и безусловно актуальной как с фундаментальной, так и с практической точки зрения, поскольку содержит комплексное исследование, включающее в себя как синтез композитных структур, так и их физико-химические характеристики, с последующим исследованием функциональных возможностей методом ГКР с применением сверхмалого количества трифенилметановых красителей.

Диссертационная работа включает введение, 6 глав и заключение. Полный объём диссертации составляет 194 страниц с 81 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 167 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также охарактеризованы степень достоверности и апробации результатов, обозначен личный вклад автора. Цели и задачи, поставленные и успешно решённые в диссертационной работе, подчеркивают её значимость и актуальность. Особенно важно, что решаемые в работе задачи носят не абстрактный, а практический характер, опираясь на конкретные материалы и широкий объём экспериментов, выполненных соискателем.

В Главе 1 представлен обзор современного состояния исследований в области наноплазмоники и гибридных металл-полупроводниковых наноструктур. Подробно рассмотрены фундаментальные механизмы возбуждения локализованных плазмонных резонансов, методы синтеза металлических наночастиц на полупроводниковых подложках, а также основные области практического применения плазмонных систем, включая

ГКР-спектроскопию. Литературный обзор позволяет получить четкое понимание о состоянии исследований в рассматриваемой области.

В Главе 2 подробно описаны используемые материалы, экспериментальные подходы синтеза композитных структур, а также комплекс экспериментальных методик исследования физико-химических и оптических свойств, обеспечивающих достоверность полученных результатов. Существенным достоинством является детальная проработка протоколов синтеза островковых пленок серебра, полусферических наночастиц серебра и наночастиц серебра контролируемой формы, внедрённых в приповерхностный слой монокристаллического кремния, что подчёркивает высокий методический уровень работы.

Глава 3 посвящена исследованию морфологии и структурных характеристик разработанных композитных систем. На основании данных растровой и атомно-силовой микроскопий, а также рентгеноструктурного анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии автором установлены закономерности формирования наночастиц серебра различной формы и размеров. Особый интерес представляют исследования механизма внедрения наночастиц серебра в приповерхностный слой монокристаллического кремния, а также влияния кристаллографической ориентации подложки на форму наночастиц серебра, что является важным научным результатом работы.

В Главе 4 выполнено численное моделирование и расчеты оптических свойств композитных структур методами конечных разностей во временной области и конечных элементов. Важным достоинством диссертации является использование формализма квазинормальных мод для выделения вклада отдельных собственных мод локализованного плазмонного резонанса в спектры экстинкции с учетом дисперсии диэлектрических проницаемостей материалов. Такой подход позволил провести глубокий физический анализ связи между геометрией наночастиц серебра и спектральным откликом, что существенно усиливает фундаментальную ценность полученных результатов.

Глава 5 содержит результаты экспериментального исследования оптических свойств синтезированных структур методами спектральной эллипсометрии, спектроскопии полного отражения, поляризационной спектрофотометрии, спектроскопии упругого рассеяния света в геометрии темного поля. На основании полученных измерений выявлены спектральные положения локализованных плазмонных резонансов в зависимости от морфологии структур в широком диапазоне длин волн от видимой до ближней инфракрасной области. Представленные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования, что подтверждает корректность предложенных физических интерпретаций.

Глава 6 посвящена исследованию функциональных свойств разработанных композитов в качестве подложек, работающих на эффекте ГКР. Продемонстрирована высокая эффективность структур на основе наночастиц серебра контролируемой формы, внедрённых в кремниевую

подложку, для детектирования сверхмалых концентраций водных растворов трифенилметановых красителей – бриллиантового зеленого и кристаллического фиолетового, достигнут предел обнаружения концентрации порядка 10 пмоль/л и коэффициент усиления сигнала порядка 10^7 , что согласуются с результатами численного моделирования. Данный результат имеет выраженную практическую значимость для задач в области сенсорики.

В заключении автором сформулированы основные результаты проведенных исследований, которые убедительно подтверждают достижение поставленных цели и задач диссертационной работы.

Отметим, что диссертация написана грамотным научно-техническим языком, логично построена, обладает внутренней целостностью и отличается высоким качеством иллюстративного материала. Название диссертационной работы соответствует поставленным целям и задачам в работе, согласуется с содержанием диссертации и автореферата.

Научная новизна работы заключается в разработке эффективного метода внедрения наночастиц серебра в приповерхностный слой монокристаллического кремния с возможностью контролируемого управления их формой, размерами и поверхностным фактором заполнения; в выявлении анизотропного характера формирования частиц в зависимости от кристаллографической ориентации подложки; в проведении численного анализа вклада отдельных собственных мод в спектры экстинкции с использованием формализма квазинормальных мод;

Практическая значимость заключается в разработке воспроизводимой методики изготовления композиционных материалов на основе монокристаллического кремния и наночастиц серебра (получен патент РФ), установлении технологических закономерностей по влиянию условий получения, а также характеристик кремниевых подложек на форму внедренных наночастиц серебра, фактор заполнения поверхности наночастицами и т.п. Важными для применения разрабатываемых сенсорных структур на практике также является комплекс результатов по влиянию типа, формы, степени анизотропии наночастиц серебра на величину сигнала ГКР и обнаружительную способность органических молекул на примере растворов красителей, в том числе в жидких смесях. Также **научной новизной и практической значимостью** обладают результаты по демонстрации высокой эффективности созданных структур в качестве ГКР-подложек для детектирования трифенилметановых красителей вплоть до концентраций порядка 10 пмоль/л.

Достоверность результатов и обоснованность выводов диссертации обеспечивается грамотным обоснованием всех выводов и научных положений. В тех случаях, когда возможно сравнение с известными зависимостями, полученные результаты согласуются с литературными данными. Результаты диссертационной работы опираются на значительный объем экспериментальных данных, полученных на

оборудовании, что обеспечивает надежность и обоснованность основных положений и выводов работы.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных изданиях, 8 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и РИНЦ, 1 патенте на изобретение, а также в 14 тезисах докладов на международных и всероссийских конференциях.

К несущественным недостаткам работы можно отнести следующее:

- из текста диссертации остается неясным каковы были условия выхода на режим высокотемпературной обработки (1000-1100°C), а также условия охлаждения образцов (временной интервал, температурный профиль нагрева/охлаждения) при внедрении наночастиц Ag в приповерхностный слой c-Si.

- в работе получены интересные результаты по механизму формирования наноструктурированного слоя оксида кремния и инкапсуляции наночастиц серебра в диоксид кремния, постулируется, что формируется слой диоксида кремния, но производилась ли экспериментальная оценка степени стехиометричности формируемого оксида, особенно при его формировании во влажной атмосфере?

- при проведении численного моделирования оптических характеристик разрабатываемых сенсорных структур как выбиралось значение эффективной диэлектрической проницаемости оксида кремния, учитывая его сложную структуру в работе, наличие пор, развитую поверхность?

Указанные замечания не носят принципиального характера и не умаляют высокой оценки диссертационной работы.

Заключение

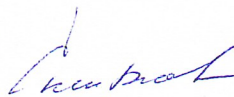
Считаем, что диссертационная работа Ерминой Анны Андреевны «Структурные и оптические свойства функционального композита на основе монокристаллического кремния и наночастиц серебра» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор, Ермина Анна Андреевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доклад по теме диссертации заслушан и обсужден на научном семинаре «Нанотехнологии и материаловедение» кафедры Микро- и наноэлектроники, отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) 08.04.2026 г. Научно-педагогический состав кафедры микро- и наноэлектроники – 50 чел., присутствовало на заседании 37 человек.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, доцентом, доцентом кафедры микро- и нанoeлектроники Спивак Юлией Михайловной и утвержден на заседании кафедры 08.04.2026 г., протокол № 4.

Результаты голосования: «за» - 37 чел.,
«против» - 0 чел.,
«воздержались» - 0 чел.

Доктор технических наук, доцент, доцент
кафедры микро-
и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Спивак Юлия Михайловна
e-mail: ymspivak@etu.ru

Заведующий кафедрой микро-
и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
доктор физико-математических наук, доцент



Комков Олег Сергеевич
e-mail: oskomkov@etu.ru

Ученый секретарь кафедры микро- и
нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,
кандидат физико-математических наук,
доцент

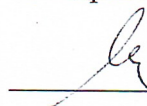


Александрова Ольга
Анатольевна
oaaleksandrova@etu.ru

Подписи Ю.М. Спивак, О.С. Комкова, О.А. Александровой заверяю:

Ученый секретарь

диссертационных советов СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Т.Л. Русяева

Сведения о ведущей организации:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
197022, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5, литера Ф.
<https://etu.ru/>
+7(812) 234-46-51
info@etu.ru