

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01.25
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 04.06.2026 № 6

О присуждении Ерминой Анне Андреевне,
гражданке Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Структурные и оптические свойства функционального композита на основе монокристаллического кремния и наночастиц серебра» по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния» принята к защите 26 марта 2026 г., протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.01.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 17 человек приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01-02-153, прил. 1 от 15 июля 2025 г.

Соискатель Ермина Анна Андреевна, дата рождения – 16 июля 1997 г., в 2021 году окончила программу магистратуры НИУ ИТМО по направлению подготовки – 16.04.01 «техническая физика».

В 2025 году окончила аспирантуру в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в процессе обучения сданы кандидатские экзамены по физике конденсированного состояния, истории и философии науки, иностранному языку (английскому).

В период подготовки диссертации работала в лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В настоящее время работает в должности научного сотрудника этой же лаборатории.

Диссертация выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель:

Жарова Юлия Александровна, кандидат физ. – мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Оппоненты:

Кособукин Владимир Артемович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник сектора теории твердого тела ФТИ им. А.Ф. Иоффе предоставил на диссертацию положительный отзыв, содержащий 4 замечания.

Осминкина Любовь Андреевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физических методов биосенсорики и нанотераностики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова предоставила на диссертацию положительный отзыв, содержащий 3 замечания.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») предоставила на диссертацию положительный отзыв, содержащий 3 замечания.

Отзыв подписали доктор технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Спивак Юлия Михайловна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Комков Олег Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Александрова Ольга Анатольевна. Отзыв утвердил доктор технических наук, проректор по научной и инновационной деятельности СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Семенов Александр Анатольевич. Диссертационная работа обсуждена на научном семинаре кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 8 апреля 2026 г, протокол № 4.

В заключении отзыва сказано:

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.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один имеет ученую степень доктора наук, другой имеет степень кандидата наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что СПбГЭТУ «ЛЭТИ» ведет активные исследования в области естественных наук, в частности в области микро- и нанoeлектроники, фотоники и биомедицинских технологий. Кроме того, в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» действуют диссертационные советы по физико-математическим наукам.

Основное содержание диссертации представлено в 9 работах, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, и 1 патенте Российской Федерации.

1. Spectroscopic Characterization of Silicon Wire-Like and Porous Nanolayers in the Process of Metal-Assisted Chemical Etching of Single-Crystal Silicon / Y. Zharova, A. Ermina, S. Pavlov, Y. Koshtyal, V. Tolmachev // *Physica Status Solidi A*. — 2019. — Т. 216, № 17. — С. 1900318.

2. Silver particles embedded in silicon: The fabrication process and their application in surface enhanced Raman scattering (SERS) / A. A. Ermina, N. S. Solodovchenko, K. V. Prigoda, V. S. Levitskii, V. O. Bolshakov, M. Y. Maximov, Y. M. Koshtyal, S. I. Pavlov, V. A. Tolmachev, Y. A. Zharova // *Applied Surface Science*. — 2023. — Т. 608. — С. 155146.

3. ГКР-активные подложки на основе внедренных наночастиц Ag в объем c-Si: моделирование, технология, применение / А. А. Ермина, Н. С. Солодовченко, К. В. Пригода, В. С. Левицкий, С. И. Павлов, Ю. А. Жарова // *Физика и техника полупроводников*. — 2023. — Т. 57, № 4. — С. 243—250.

4. Plasmonic disordered array of hemispherical AgNPs on SiO₂@c-Si: their optical and SERS properties / A. A. Ermina, N. S. Solodovchenko, V. S. Levitskii, N. A. Belskaya, S. I. Pavlov, V. O. Bolshakov, V. A. Tolmachev, Y. A. Zharova // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — 2024. — Т. 169. — С. 107861.

5. Plasmonic hemispherical Ag nanoparticles on silicon substrate: A comprehensive study of optical properties / A. A. Ermina, N. S. Solodovchenko, V. O. Bolshakov, K. V. Prigoda, D. P. Markov, Y. A. Zharova // *Optical Materials*. — 2024. — Т. 157. — С. 116315.
6. Anisotropic process of Ag nanoparticles embedding into c-Si during high-temperature annealing / Y. A. Zharova, A. A. Ermina, N. S. Solodovchenko, V. O. Bolshakov, K. V. Prigoda, N. A. Belskaya, D. P. Markov, S. A. Grudinkin // *Applied Surface Science*. — 2025. — Т. 682. — С. 161549.
7. Optical anisotropy of boat-shaped silver nanoparticles embedded in silicon (110) / Y. A. Zharova, A. A. Ermina, K. V. Prigoda, V. O. Bolshakov, E. S. Fedorova, D. M. Markov // *Physics of Metals and Metallography*. — 2025. — Т. 126, № 14. — С. 1768—1775.
8. Boat-shaped Ag nanoparticles embedded in c-Si (110): From fabrication to potential SERS application / A. Ermina, N. Solodovchenko, A. Larin, V. Bolshakov, K. Prigoda, D. Markov, Y. Zharova // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. — 2026. — Т. 211. — С. 113384.
9. Shape-controlled embedded silver nanoparticles and nanopits in silicon substrates (100), (110), (111): A comparative study of potential SERS application / A. Ermina, A. Larin, N. Solodovchenko, D. Markov, D. Krasilina, N. Belskaya, K. Prigoda, V. Bolshakov, Y. Zharova // *Materials Science in Semiconductor Processing*. — 2026. — Т. 207. — С. 110462.

Жарова Ю. А., Ермина А. А. Патент на изобретение "Способ изготовления композитной наноструктуры на основе серебра и монокристаллического кремния". 2025. РФ, № 2853459 опублик. 23.12.2025, Бюл. № 36.

На автореферат поступило 6 отзывов.

1. Отзыв Берковица Владимира Леонидовича, кандидата физико-математических наук, заведующего лабораторией оптики поверхности ФТИ им. А.Ф. Иоффе положительный, замечаний не содержит.
2. Отзыв Вартаняна Тиграна Арменаковича, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, профессора Международного научно-образовательного центра физики наноструктур ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» положительный, содержит 1 замечание:
 - Единственное замечание относится к использованию для характеристики плазмонных свойств неоднородного ансамбля металлических наночастиц псевдодиелектрической функции, которая рассчитывается по данным эллипсометрии. Не ставя под сомнение

полезность эллипсометрических измерений как таковых, считаю пересчет их указанным образом в свойства гипотетической однородной пленки малоинформативным.

3. Отзыв Липовского Андрея Алексеевича, доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой функциональных микро – и наноматериалов, профессора СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова положительный, содержит 3 замечания:

- Из текста автореферата трудно сделать вывод, получено ли количественное соответствие между результатами выполненного моделирования (глава 4 и 5 диссертации) и результатами эксперимента, или же соответствие является исключительно качественным.
- Неясно, не должны ли вносить переходы d-электронов серебра систематическую погрешность в расчеты положений квадрупольных мод наночастиц.
- На мой взгляд, автору диссертации имело смысл обратить более пристальное внимание на рамановский сигнал от наночастиц серебра, с которых слой окиси кремния не удален. В этом случае, несмотря на падение предела обнаружения аналита, появляется возможность проведения измерений для биологических объектов, поскольку, как известно, их непосредственный контакт с поверхностью наночастиц серебра зачастую приводит к деградации биологических аналитов.

4. Отзыв Журихиной Валентины Владимировны, доктора физико-математических наук, профессора Высшей школы фундаментальных физических исследований ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» положительный, содержит 2 замечания и 1 вопрос:

- Вещественная часть псевдоэлектрической функции островковых пленок серебра (Рис. 10 автореферата) принимает значения, существенно больше единицы в оптическом диапазоне, хотя диэлектрическая функция композитной среды должна принимать промежуточные значения между диэлектрическими функциями своих составляющих, в данном случае, серебра (вещественная часть отрицательна) и воздуха. Как объясняется этот результат? Проводилось ли моделирование псевдоэлектрической функции островковых пленок серебра с помощью метода эффективной среды Максвелла-Гарнетта или Бруггемана?
- В Таблице 1 приведены только экспериментальные данные по коэффициенту усиления, однако в тексте автореферата упоминается и расчет КУ (стр. 16). Уместно было бы привести сравнение эксперимента с расчетом для различных структур.

- Рисунки в автореферате «оторваны» от текста, что затрудняет чтение.

5. Отзыв Перовой Татьяны Сергеевны, кандидата физико-математических наук, почетного профессора факультета электроники и электрической инженерии Тринти колледжа Дублина, Университета Дублина положительный, замечаний не содержит.

6. Отзыв Тимошенко Виктора Юрьевича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры физики низких температур и сверхпроводимости (Физический факультет) МГУ имени М.В. Ломоносова положительный, содержит 2 замечания:

- Отсутствует количественное сопоставление полученных ГКР-характеристик с альтернативными структурами, что затрудняет объективную оценку достигнутого уровня.
- Подписи к отдельным рисункам могли бы быть более развернутыми для облегчения самостоятельного восприятия представленных результатов.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по синтезу, структурной и оптической характеристике Ag-Si композитных структур и оценке их функциональных свойств в качестве ГКР-подложек были получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика получения уникальных функциональных композитных структур на основе c-Si матрицы с внедренными AgНЧ контролируемой формы, основанная на высокотемпературном отжиге островковых пленок Ag в атмосфере водяного пара. Предложен механизм внедрения AgНЧ, который заключается в одновременном процессе окисления c-Si и диффузии атомов Si через сплав Ag-Si. Форма внедренных AgНЧ определяется ориентацией подложки: c-Si(100) – пирамида с 4-кратной симметрией; c-Si(110) – «лодка» с 2-кратной симметрией; c-Si(111) – усеченный тетраэдр с 3-кратной симметрией. Размеры и поверхностные факторы заполнения AgНЧ зависят от морфологии исходной островковой пленки Ag, полученной методом гальванического вытеснения из водного раствора AgNO₃:HF. Исследованы морфология и структура островковых пленок Ag, а также промежуточного композита на основе массива полусферических AgНЧ на c-Si подложке.

2. Методами конечных элементов и конечных разностей во временной области численно исследованы положения мод ЛПР в зависимости от формы, размеров AgНЧ, окружения, угла падения и поляризации света. С

помощью формализма квазинормальных мод проведен анализ отдельного вклада каждой собственной моды ЛПП в спектры сечений экстинкции AgНЧ в форме полусферы, пирамиды, «лодки» и усеченного тетраэдра на/в кремниевой подложке с учетом дисперсии диэлектрических проницаемостей от видимого до ближнего ИК-диапазонов.

3. Экспериментально исследованы оптические характеристики трех типов композитных структур. Определены положения ЛПП в спектральном диапазоне от видимого до ближнего ИК. Анизотропные AgНЧ в форме «лодки» при внедрении в c-Si(110) ориентируются вдоль направления [10]. Методом спектральной эллипсометрии было продемонстрировано, что такие AgНЧ демонстрируют оптическую анизотропию. При азимутальном повороте образца на 90 происходит изменение ориентации электрического поля волны относительно оси наночастиц с продольной на поперечную, что приводит к сдвигу спектрального положения ЛПП ~ 100 нм (~ 0.5 эВ) в области 400–600 нм (2–3 эВ), причем величина сдвига определяется средним аспектным отношением AgНЧ.

4. Продемонстрирована функциональная возможность количественного обнаружения водных растворов синтетических органических красителей методом ГКР всех исследуемых структур. AgНЧ контролируемой формы, внедрённые в c-Si, демонстрируют предел обнаружения концентрации трифенилметанового красителя до 10 пмоль/л, обеспечиваемый коэффициентом усиления сигнала КРС $\sim 10^7$. Полученные результаты указывают на перспективность разработанных композитных структур в качестве высокочувствительных сенсоров.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Фундаментальная значимость работы заключается в установлении механизма формирования композитных структур на основе внедренных наночастиц серебра в приповерхностный слой кремния, выявлении закономерностей влияния кристаллографической ориентации кремния и морфологии наночастиц на плазмонные свойства и коэффициент электромагнитного усиления. Практическая значимость работы заключается в разработке технологического подхода формирования Ag-Si композитов с контролируемой морфологией, перспективных для применения в качестве высокочувствительных ГКР-подложек, оптических сенсоров и функциональных элементов кремниевой фотоники. Высокая степень достоверности результатов обеспечивается их подтверждением комплексом взаимодополняющих экспериментальных методов

исследования, а также качественным согласованием экспериментальных и численных результатов моделирования. Обоснованность сделанных выводов и сформулированных положений подтверждается согласием с имеющимися представлениями в физике конденсированного состояния.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Внедрение наночастиц Ag в приповерхностный слой c-Si при высокотемпературной обработке ($T > T_{\text{эвтектики}}(\text{Ag-Si})$) островковой пленки Ag в атмосфере водяного пара достигается за счет одновременных процессов окисления c-Si и диффузии атомов Si через сплав Ag-Si.
2. Форма внедренных наночастиц Ag определяется ориентацией подложки: c-Si(100) – четырёхгранная пирамида, c-Si(110) – «лодка», c-Si(111) – усечённый тетраэдр. Размеры и поверхностный фактор заполнения наночастиц Ag контролируются концентрацией раствора $\text{AgNO}_3:\text{HF}$, временем реакции гальванического вытеснения и длительностью последующей высокотемпературной обработки.
3. Анизотропные наночастицы Ag в форме «лодки» при внедрении в c-Si(110) ориентируются вдоль направления [10] и демонстрируют оптическую анизотропию. Изменение ориентации электрического поля световой волны относительно оси наночастиц с продольной на поперечную приводит к сдвигу энергии локализованного плазмонного резонанса на 0.5 эВ в видимой спектральной области.
4. Наночастицы Ag контролируемой формы, внедренные в c-Si, приводят к усилению комбинационного рассеяния света от нанесенного на поверхность трифенилметанового красителя в 10^7 раз и позволяют достичь предела обнаружения концентрации до 10 пмоль/л.

Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично или при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в постановке и реализации значительной части экспериментальных исследований, направленных на получение и изучение композитных структур на основе монокристаллического кремния и наночастиц серебра. Автором выполнен синтез исследуемых структур, включая формирование островковых пленок Ag, массивов полусферических наночастиц Ag, а также наночастиц Ag, внедренных в приповерхностный слой c-Si. Соискателем разработаны и оптимизированы режимы термической обработки и технологические параметры формирования исследуемых систем. Автор принимал непосредственное участие в исследовании морфологии и структурных

характеристик образцов методами растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа и энергодисперсионной спектроскопии, а также в измерении оптических характеристик исследуемых структур, включая спектры отражения, рассеяния и комбинационного рассеяния света. Автор принимал непосредственное участие в численном моделировании электромагнитного отклика композитных структур, включая расчет оптических характеристик и анализ спектральных особенностей с использованием формализма квазинормальных мод. Подготовка публикаций по теме диссертации, тезисов докладов и представление результатов работы на всероссийских и международных конференциях осуществлялись при определяющем участии автора.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 14 докторов наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

На заседании 4 июня 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Ерминой Анне Андреевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Ю.Г. Курсаев

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

М.А. Семина

4 июня 2026 г.