

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.340.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 03.06.2026 № 7

О присуждении Калининой Екатерине Александровне, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и $Si_{1-x}Ge_x$ с модифицированным изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников – принята к защите 31 марта 2026 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом 24.2.340.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Калинина Екатерина Александровна, 6 февраля 1996 года рождения. В 2019 году соискатель окончила федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», в 2024 году закончила освоение программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре очной формы обучения по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», работает в должности инженера отдела разработки и выпуска водородных генераторов и дискриминаторов АО «Время-Ч».

Диссертация выполнена на кафедре физики полупроводников, электроники и наноэлектроники физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Ежевский Александр Александрович, профессор кафедры физики полупроводников, электроники и наноэлектроники физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Аверкиев Никита Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Центр физики наногетероструктур, заведующий сектором;
2. Юсупов Роман Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, кафедра квантовой электроники и радиоспектроскопии, заведующий кафедрой,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук (ИХВВ РАН), г. Нижний Новгород, в своем положительном отзыве, составленном и подписанном Котеревой Татьяной Владимировной, кандидатом химических наук, старшим научным сотрудником лаборатории аналитической химии высокочистых веществ, и утверждённом доктором химических наук, член-корреспондентом РАН, директором ИХВВ РАН Булановым Андреем Дмитриевичем, указала, что «исследования в области спинтроники на моноизотопных кремний-германиевых кристаллах являются

актуальными для развития квантовых технологий, создания новых информационных систем и проведения фундаментальных исследований». В отзыве ведущей организации делается вывод, что диссертация Калининой Е.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой были получены результаты, имеющие важное значение для развития как физики полупроводников в целом, так и смежных областей науки. Диссертационная работа Калининой Екатерины Александровны «Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с модифицированным изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием» по своей актуальности, объёму выполненных исследований, достоверности полученных данных, научной новизне и практической значимости соответствует требованиям, изложенным в пп. 9 – 14 «Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 25.01.2024) О порядке присуждения учёных степеней», а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ: в том числе по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации – публикации в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, и (или) индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

1. **Kalinina, E.A.** Electron Spin Resonance of Lithium Related Donor Centers in Bulk $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Crystals Enriched in ^{28}Si and ^{72}Ge Isotopes. / E.A. Kalinina, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, D.G. Zverev, F.F. Murzakhanov, N.V. Abrosimov // Applied Magnetic Resonance. – 2024. – V. 55. – P. 551–564.

Вклад соискателя: 1) регистрация спектров поглощения электронного спинового резонанса в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ с помощью метода непрерывного насыщения, 2) регистрация спектров поглощения в зависимости от ориентации образца относительно линий внешнего магнитного поля, 3) исследование температурных зависимостей скоростей спиновой релаксации $1/T_s$, 4) обработка и анализ данных, 5) написание текста статьи.

2. Ezhevskii, A.A. Behavior of Phosphorus Donors in Bulk Single-Crystal Monoisotopic $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Alloys / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, P.G. Sennikov, **E.A. Kalinina**, N.V. Abrosimov // Semiconductors. – 2020. – V. 54. – N. 9. – P. 1123–1126.

Вклад соискателя: 1) регистрация спектров поглощения электронного спинового резонанса в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ с помощью метода непрерывного насыщения, 2) исследование температурных зависимостей скоростей спиновой релаксации $1/T_s$, 3) расчет параметров долинно-орбитального расщепления 1s-состояния фосфора, 4) обработка и анализ данных, 5) написание текста статьи.

3. Ezhevskii, A.A. Behavior of Lithium Donors in Bulk Single-Crystal Monoisotopic $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ Alloys / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, P.G. Sennikov, **E.A. Kalinina**, N.V. Abrosimov // Semiconductors. – 2020. – V. 54. – N. 10. – P. 1336–1340.

Вклад соискателя: 1) регистрация спектров поглощения электронного спинового резонанса в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ с помощью метода непрерывного насыщения, 2) регистрация спектров поглощения в зависимости от ориентации образца относительно линий внешнего магнитного поля, 3) обработка и анализ данных, 4) написание текста статьи.

4. Ezhevskii, A.A. Generation of Spin Currents in n-Si Doped with Phosphorus, Antimony, and Bismuth and the Role of Spin-Flip Scattering Processes / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, **E.A. Kalinina**, A.V. Novikov // Semiconductors. – 2021. – V. 55. – N. 8. – P. 654–658.

Вклад соискателя: 1) расчет напряжений инверсного спинового эффекта Холла при разной концентрации доноров и толщине слоев, 2) обработка и анализ данных.

5. Ezhevskii, A.A. Impact of spin-flip scattering on spin current and inverse Spin-Hall effect in silicon doped by bismuth, antimony or phosphorus / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Sukhorukov, **E.A. Kalinina**, E.A. Karashtin, D.V. Yurasov // Physica B: Condensed Matter. – 2023. – V. 674. – P. 415551.

Вклад соискателя: 1) расчет напряжений инверсного спинового эффекта Холла, 2) обработка и анализ данных.

Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим. Остальные результаты, приведённые в опубликованных работах, получены в соавторстве при её непосредственном участии. Соискатель принимала непосредственное участие в обсуждении и анализе полученных результатов и подготовке работ к печати. Сведения о приведенных в диссертации опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты его диссертации, достоверны.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов:

1. Цыпленков Вениамин Владимирович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела физики полупроводников Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», отмечает в своем отзыве, что «побочный результат исследований, а именно экспериментальное подтверждение факта, что атомы фосфора и германия в слабых $Si_{1-x}Ge_x$ растворах распределяются друг относительно друга произвольным образом, и указание на возможную модель, описывающую их взаимное распределение, что важно для других направлений научных исследований, в которых важно знание влияние атомов Ge в таких структурах на электронные состояния доноров фосфора». Отзыв не содержит замечаний.

2. Тарасов Михаил Александрович, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН в своем отзыве отмечает, что автореферат содержит четкую постановку цели и задач, полную характеристику методологии, детальное описание полученных результатов, обоснованные выводы. К недостаткам можно отнести краткость описания некоторых экспериментальных методик. Отзыв положительный.

3. Грязнова Мария Вадимовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник производственно-технологического отдела разработки технологий и изготовления пластин с кристаллами СБИС филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е.

Седакова». Отзыв содержит следующее замечание: «в тексте автореферата упоминается как термин ЭПР, так и ЭСР, следовало бы делать это единообразно».

4. Хайбуллин Рустам Ильдусович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационной физики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук». Отзыв содержит следующие замечания: 1) на рис.2 отсутствует панель (с), относящая к ЭПР измерениям кристаллов кремния с высокой концентрацией германия ($x=0,029$), а также не указана ориентация статического магнитного поля H по отношению к осям кристалла; 2) на рис.4 на месте панели (а) появилась некая панель (с), по-видимому, из рис.2? Также на всех панелях рисунка 4 не приведены стрелки, показывающие положения линий сверхтонкой структуры фосфора, хотя они и упоминаются в подписи к рисунку. Отзыв положительный.

5. Гавриленко Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета. Отзыв содержит следующие замечания: 1) не представлен метод обогащения изотопами, наличие и состав примесей в исходных образцах, которые могут иметь значение при интерпретации результатов; 2) в подписи к рисунку 4 (а) говорится о стрелках, указывающих «положения линий фосфора ...», которые на рисунке отсутствуют, а самого обозначения (а) нет, при этом в диссертации на месте левого верхнего графика находится совершенно иной график; 3) На рисунке 9 (б) в автореферате (в диссертации на рис. 39 (б)) горизонтальная шкала графика (с учетом единиц измерения) представляется не соответствующей размерам изучаемых объектов. Здесь требуется пояснение. Отзыв положительный.

Все отзывы на автореферат диссертации положительные, в них отмечается актуальность темы исследования, новизна результатов, их научная и практическая значимость, а также делается вывод, что рассматриваемая диссертация соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а соискатель Е.А. Калинина заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью в научном сообществе специалистов в области физики полупроводников, наличием значительного числа публикаций, посвященных исследованию полупроводниковых материалов и, как следствие, тематической близостью их научных исследований и диссертационной работы соискателя, связанной с исследованием доноров в кристаллах кремния и кремний-германия.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН – центр исследований по получению и анализу высокочистых веществ и материалов, на их базе создаются материалы, востребованные новыми высокотехнологичными отраслями промышленности. Основные направления его деятельности: получение, анализ и исследование свойств высокочистых веществ, в том числе моноизотопных; создание новых материалов на основе высокочистых веществ; разработка научных основ технологии высокочистых веществ и материалов, функциональных устройств на их основе.

Первый официальный оппонент, доктор физико-математических наук Аверкиев Никита Сергеевич – высококвалифицированный специалист в области физики примесных центров и дефектов в кристаллах, квантового транспорта, спин-зависимых кинетических явлений в наноструктурах и теории поверхностных волн.

Второй официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, Юсупов Роман Валерьевич – высококвалифицированный специалист в области исследований материалов методами магнитного резонанса и оптической спектроскопии полупроводниковых структур.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

впервые исследованы процессы спинового резонанса и спиновой релаксации в изотопно-чистом твердом растворе $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при малом ($x < 3\%$) содержании германия методом электронного спинового резонанса (ЭСР), а также влияние доноров с большим спин-орбитальным взаимодействием (висмут, сурьма) на спиновое рассеяние в структурах n-Si на пермаллое;

предложены модели, которые описывают спиновую релаксацию доноров в моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенных бесспиновыми изотопами ^{28}Si

(99,998%) и ^{72}Ge (99,984%). Такой твердый раствор является малоизученным по сравнению с ^{28}Si . Впервые в структуре пермаллой/n-Si:Bi на основе теории спиновой накачки и диффузионной модели рассчитаны зависимости величины спиновых токов и напряжения инверсного спинового эффекта Холла (ИСХЭ) от параметров слоев кремния, легированных висмутом. Обосновано отсутствие сигналов инверсного спинового эффекта Холла при легировании слоя кремния только фосфором или сурьмой;

доказано, что атомы германия в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при содержании германия в кремнии на уровне 0,3 – 3% существенно влияют на спиновые характеристики электронов, локализованных при низких температурах на донорах фосфора и лития: резонансные частоты, параметры сверхтонких взаимодействий, скорости спиновой релаксации. В $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ существуют литиевые центры, различающиеся временами спиновой когерентности T_2 и спин-решеточной релаксации T_1 .

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены результаты исследования спиновых процессов в моноизотопном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенном бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%), спинового транспорта и спинового рассеяния в кремниевых структурах, легированных тяжелым донором с большой спин-орбитальной связью; **применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** методы электронного парамагнитного резонанса, ионной имплантации и диффузионного легирования для получения кремниевых слоев с заданным уровнем легирования примесями, такими как: висмут, сурьма, фосфор, литий;

раскрыты

- 1) особенности спектров электронного спинового резонанса в изотопно-чистых монокристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при низких температурах по сравнению с аналогичными кристаллами с природной композицией изотопов кремния и германия;
- 2) влияние атомов германия на спиновые характеристики электронов, локализованных при низких температурах на донорах фосфора в изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}$ даже при малом содержании германия $x < 3$ ат. %, в результате чего наблюдаются дополнительные линии сверхтонкой структуры

от пространственно-неэквивалентных донорных центров фосфора;

3) причины понижения симметрии парамагнитных центров лития в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при $x < 3$ ат. % по сравнению с чистым кремнием;

4) особенности основного состояния лития в изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$, его отличие от доноров V группы;

изучены процессы рассеяния спинов с переворотом, которые приводят к немонотонной зависимости напряжения инверсного спинового эффекта Холла от концентрации тяжелого донора с большой спин-орбитальной связью при одинаковой толщине легированного слоя в кремнии. С ростом концентрации Bi можно достичь значительно большей вероятности рассеяния спина на примеси с большой спин-орбитальной связью и, соответственно, значений инверсного спинового эффекта Холла, но при этом уменьшая толщину легированного слоя кремния, из-за уменьшения длины спиновой диффузии с ростом концентрации Bi .

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они могут быть использованы при создании приборов для квантовых вычислений. Результаты важны для исследования спиновых кубитов на основе полупроводниковых структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, слои которых обладают высокой степенью изотопной чистоты.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ – результаты получены с применением современного научного оборудования, соответствующего мировому уровню, их достоверность обусловлена использованием совокупности хорошо апробированных экспериментальных методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации экспериментальных результатов;

идея базируется на обобщении множества экспериментальных фактов, полученных как соискателем, так и опубликованных ранее;

использованы современные экспериментальные методы исследования, хорошо себя зарекомендовавшие при изучении полупроводниковых материалов;

установлена корреляция результатов исследований, полученных в диссертации, с данными, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в: анализе литературных данных по

теме исследования, участии в экспериментах, анализе и интерпретации полученных результатов, оформлении и подготовке по результатам исследований публикаций в виде статей и докладов на конференциях различного уровня. Постановка цели, задач и обсуждение полученных результатов диссертационного исследования, а также формулировка выводов проводились совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. проф. Ежевским А.А.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в различных научно-образовательных и научно-исследовательских организациях, среди которых можно выделить Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань), Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (г. Казань), Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук (г. Нижний Новгород), Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург), Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород), Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (г. Москва), Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

В ходе защиты диссертации критические замечания высказаны не были. Соискатель Е.А. Калинина ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, приведя собственную аргументацию.

На заседании 3 июня 2026 г. диссертационный совет принял решение:

за решение научной задачи по исследованию поведения донорных центров фосфора и лития в изотопно-чистом твердом растворе $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при малом ($x < 3\%$) содержании германия методом электронного спинового резонанса, а также влияния доноров с большим спин-орбитальным взаимодействием (висмут, сурьма) на спиновое рассеяние в структурах n-Si/пермаллой, которое вносит вклад в

физику полупроводников, а также имеет практическую значимость для разработки спиновых кубитов на основе полупроводниковых структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, слои которых обладают высокой степенью изотопной чистоты, присудить Калининой Екатерине Александровне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.11. Физика полупроводников), участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 (нет) человек, проголосовали: за 14, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель

диссертационного совета



Чупрунов Евгений Владимирович

Ученый секретарь

диссертационного совета



Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 03.06.2026 г.