

д.х.н., чл.-корр. РАН

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИХВВ РАН
Буланов А.Д.
23 апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Калининой Екатерины Александровны «**Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и Si_{1-x}Ge_x с модифицированными изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников

В настоящее время устройства спинтроники являются перспективными для создания квантового компьютера. Кубиты на кремний - германиевых кристаллах, обогащённых изотопами, представляют интерес для разработки масштабируемых квантовых вычислительных устройств. Для реализации таких устройств необходимо подробно исследовать спин-зависимые эффекты, которые позволяют управлять спиновыми состояниями кубитов и подавлять декогерентность.

Использование кристаллической матрицы обогащённой бесспиновыми изотопами ²⁸Si и ⁷²Ge приводит к значительной изоляции спинов в квантовых состояниях, что увеличивает время спиновой когерентности. Это проявляется также в сужении линий в спектрах ЭПР, повышении разрешения спектров, обеспечении дополнительных возможностей для изучения структурных особенностей основного состояния доноров. На основе исследований спектров ЭПР электронов, связанных с мелкими донорами, такими как литий или фосфор, спины которых чувствительны к окружению в SiGe, возможно также получить данные о свойствах моноизотопных материалов.

Таким образом, исследования в области спинтроники на моноизотопных кремний-германиевых кристаллах, являются **актуальными** для развития квантовых технологий, создания новых информационных систем и проведения фундаментальных исследований.

Диссертационная работа Калининой Екатерины Александровны посвящена актуальной проблеме – исследованию поведения донорных центров в изотопно-обогащённых кристаллах Si_{1-x}Ge_x с малым содержанием германия методом ЭПР и исследования процессов спинового рассеяния в кристаллах Si легированного

тяжелыми донорами (Bi, Li). Сформулированные цели и задачи соответствуют выводам, результаты изложены полно и последовательно

Актуальность исследований 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%) для создания квантовых компьютеров и получение данных о взаимодействии ядерных спинов кубитов со спинами атомов окружающей их матрицы на основе полупроводниковых структур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, высокой степенью изотопной чистоты, а также влияние доноров с большим спин-орбитальным взаимодействием на спиновое рассеяние в структурах $n\text{-Si}$ /Pu не вызывает сомнений.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на воспроизводимых экспериментальных данных, полученных с использованием современного оборудования и традиционно хорошо зарекомендовавших себя экспериментальных методов исследования и получения полупроводниковых структур. Совокупностью хорошо апробированных экспериментальных и расчётных методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации полученных экспериментальных результатов.

Проведённые в ходе диссертационной работы исследования опираются на результаты работ, опубликованных по данной тематике ранее и приведённых в списке цитируемой литературы.

Основные результаты и положения настоящей работы представлены в статьях, опубликованных в цитируемых российских и зарубежных изданиях, и неоднократно обсуждались на научных конференциях.

Личное участие соискателя в настоящей работе заключается в его непосредственном участии на всех этапах диссертационной работы, включая выполнение экспериментов, анализ и интерпретацию полученных результатов, оформление и подготовку 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 проводилось совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. проф. Ежевским А.А., а также другими соавторами опубликованных работ.

Научная новизна диссертационной работы Калининой Е.А. состоит в том, что впервые исследованы процессы спиновой релаксации в моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенных бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99.998%) и ^{72}Ge (99.984%). Впервые установлено, что атомы германия в $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при x (0.3 – 3%) существенно влияют на спиновые характеристики электронов, локализованных при низких температурах на донорах фосфора и лития. Впервые показано, что 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 . Спины донорных электронов атомов лития чувствительны к различному содержанию германия в ближайших координационных сферах вокруг лития. В структуре $\text{Pv}/n\text{-Si}:\text{Bi}$ на основе теории спиновой накачки и диффузионной модели впервые рассчитаны зависимости величины спиновых токов и напряжения инверсного спинового эффекта Холла от параметров слоев кремния, легированных висмутом. Обосновано отсутствие сигналов инверсного спинового эффекта Холла при легировании слоя кремния только фосфором или сурьмой.

Практическая и научная значимость работы. В работе Калининой Е.А. был решён ряд актуальных задач современной *физики полупроводников* что можно отнести к основным научным и практическим достижениям, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования. В диссертационной работе впервые рассмотрены спиновые процессы в моноизотопном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, обогащенном бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99.998%) и ^{72}Ge (99.984%). Одним из наиболее перспективных направлений применения таких кристаллов является создание приборов для квантовых вычислений. Результаты работы 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. Часть результатов работы включена в отчёт по проекту «Разработка спиновой концепции создания кубитов на основе эпитаксиальных гетероструктур Si/SiGe и исследование влияния окружения на параметры созданных кубитов», выполняемого при поддержке Госкорпорации «Росатом».

Спиновый транспорт и спиновое рассеяние в кремниевых структурах, легированных тяжелым донором с большой спин-орбитальной связью, могут быть

использованы при разработке приборов на эффектах спиновой поляризации и спинового рассеяния.

Содержание диссертации. Основные результаты работы достаточно полно представлены в 5 статьях в рецензируемых периодических изданиях, индексируемых в Scopus и рекомендованных ВАК РФ, и 15 тезисах докладов конференций.

Диссертационная работа Калининой Е.А. изложена на 106 страницах, включает в себя введение, 5 глав, заключение, список сокращений и условных обозначений и список литературы из 101 наименования.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы исследования, обозначает цель и задачи диссертационной работы, формулирует научную новизну, теоретическую, практическую значимость работы и выносимые на защиту положения, структурирует методологию и методы исследования, приводит информацию о личном вкладе в работу, степени достоверности, апробации результатов проведённого исследования и структуре диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору, в котором отдельные разделы посвящены особенностям полупроводниковых структур Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и их практическому применению в спинтронике, обсуждаются электронные свойства мелких доноров V группы в Si. Проводится анализ сверхтонких взаимодействий электронов, локализованных на донорах с учетом изотопных эффектов. Рассматриваются особенности механизмов спиновой релаксации доноров V группы в кремнии и спинового эффекта Холла (СХЭ).

Во **второй главе** приведено описание исследуемых образцов и методов их получения, приведена методика расчёта скоростей спиновой релаксации методом насыщения и импульсным методом, а также представлена техника эксперимента.

Третья глава посвящена исследованию поведения мелкого донорного центра фосфора в объемных кристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ методом электронного спинового резонанса. Изучение сверхтонкой структуры спектра донорного электрона позволяет получить информацию о плотности волновой функции донора в основном состоянии на ядре ^{31}P ($I = 1/2$). С помощью температурных зависимостей скоростей спиновой релаксации ($T = 3.5\text{--}30\text{ K}$) определены механизм релаксации и величина долин-орбитального расщепления состояния донора.

В четвёртой главе изучено поведение доноров лития в объёмных монокристаллических моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0.0039-0.05$), обогащённых бесспиновыми изотопами ^{28}Si и ^{72}Ge методом электронного парамагнитного резонанса, получены угловые зависимости и определены времена спиновой релаксации.

В пятой главе представлены результаты исследований кремниевых структур, легированных тяжелым донором Bi , с применением методик спинового резонанса и инверсного спинового эффекта Холла.

Главы 3, 4 и 5 сопровождаются выводами из полученных результатов.

В разделе **Заключение** проводится обобщение полученных результатов исследования.

Замечания по диссертации

По рассмотренной диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. В работе отсутствует информация о методах определения концентраций донорных примесей в изученных образцах Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

2. В тексте недостаточно подробно описаны методы получения исходных изотопно - обогащённых монокристаллов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, не приводятся данные о химической чистоте образцов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и Si , содержание в них кислорода и электро активных примесей.

3. В четвёртой главе диссертационной работы при описании результатов исследования спиновой релаксации доноров лития в образцах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ различными методами, отсутствуют оценки, позволяющие определить, достаточно ли значений рассчитанных времён релаксации для практических применений.

Следует отметить, что приведённые замечания носят рекомендательный характер, не затрагивают положений, выносимых на защиту и не ставят под сомнения сформулированные в работе выводы.

Заключение. Диссертация Калининной Е.А. на тему «Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с модифицированными изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием» соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников» в части пункта 3 «Примеси и дефекты в полупроводниках и композитных структурах», пункта 4

«Поверхность и граница раздела полупроводников, полупроводниковые гетероструктуры, контактные явления», пункта 5 «Электронные спектры полупроводниковых материалов и композиционных соединений на их основе», пункта 11 «Динамика кристаллической решетки. Электрон-фононное взаимодействие. Квантоворазмерные структуры» и пункта 11 «Моделирование свойств и физических явлений в полупроводниках и структурах».

Учитывая вышеизложенное, 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 $Si_{1-x}Ge_x$ 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.

Диссертационная работа и автореферат Калининой Е.А. были рассмотрены и обсуждены на семинаре лаборатории аналитической химии высокочистых веществ (Протокол № 1 от 6 апреля 2026 года), а отзыв заслушан и утверждён на заседании учёного совета ИХВВ РАН (Протокол № 2 от 13 апреля 2026 года).

Отзыв ведущей организации составлен Котеревой Татьяной Владимировной, кандидатом химических наук, старшим научным сотрудником лаборатории аналитической химии высокочистых веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук.

_____ Котерева Татьяна Владимировна

Дата: «13» апреля 2026 г.

Подпись руки Котеревой Т.В. заверяю: _____

Ученый секретарь ИХВВ РАН, к.х.н. _____ М.Е. Комшина



Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Институт химии
высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук (ИХВВ РАН)

Адрес: 603951, Н.Новгород, Бокс-75, ул. Тропинина, 49

Тел. (831) 46 [REDACTED] koms [REDACTED]

Котерева Т.Е. [REDACTED] 2-75 [REDACTED] a@ihps-nnov.ru