

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу 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 ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - Физика
полупроводников

Предметом экспериментальных исследований диссертационной работы были изотопно-чистые кристаллы кремния и твердые растворы кремний-германия. Это очень интересный и актуальный объект как с точки зрения фундаментальной физики, так и технических приложений. Твердый раствор уникален тем, что спин-орбитальное взаимодействие в Si практически отсутствует, а энергетические зоны для электронов и дырок в Ge в значительной степени сформированы этим взаимодействием. В $Si_{1-x}Ge_x$ при единицах атомных процентов будет реализовываться некоторая новая промежуточная ситуация, которую необходимо исследовать. Одним из методов исследований, используемых в диссертационной работе, является весьма чувствительный к спин-зависимым эффектам ЭПР, то выбор объекта изучения в совокупности с методиками делает предмет изучения **актуальным**. Прикладная важность диссертационной работы обусловлена детальным исследованием образцов Si, основного материала электроники, а с учетом усиления спин-орбитального взаимодействия в $Si_{1-x}Ge_x$ открывается возможность использовать этот материал в полупроводниковой спинтронике.

Цель работы в целом состоит в исследовании поведения донорных центров фосфора и лития в изотопно-чистом твердом растворе $^{28}Si_{1-x}^{72}Ge_x$ при малом ($x < 3\%$) содержании германия методом электронного спинового резонанса, а также влияние доноров с большим спин-орбитальным взаимодействием (висмут, сурьма) на спиновое рассеяние в структурах n -Si/Pu. **Научная новизна** работы состоит в том, что в ней впервые исследованы процессы спиновой релаксации в моноизотопных сплавах $Si_{1-x}Ge_x$, обогащенных бесспиновыми изотопами ^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%), и установлено, что атомы германия в $^{28}Si_{1-x}^{72}Ge_x$ 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. Впервые показано, что в $^{28}Si_{1-x}^{72}Ge_x$ существуют литиевые центры, различающиеся временами спиновой когерентности T_2 и спин-решеточной релаксации T_1 . Для структур Pu/ n -Si:Bi на основе теории спиновой накачки и диффузионной модели рассчитаны зависимости величины спиновых токов и напряжения инверсного спинового эффекта Холла от параметров слоев кремния, легированных

висмутом. **Диссертационная работа состоит** из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, общий объём составляет 104 страницы.

В целом диссертационная работа состоит из экспериментального исследования методами электронного спинового резонанса соединений $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и анализа экспериментальных данных по спиновому эффекту Холла и обратному спиновому эффекту Холла в $\text{P}_y/n\text{-Si:Bi}$. Во Введении обоснована актуальность работы и ее достоверность, сформулированы цели исследований, вошедших в диссертацию, и определены положения, выносимые на защиту. В Первой главе проведен анализ имеющихся в научной литературе данных, касающихся особенностей энергетических спектров мелких доноров в кремнии и твердом растворе кремний-германия. Отдельное внимание уделено явлениям, влияющим на процессы спин-решёточной релаксации, спин-орбитальному взаимодействию и сверхтонкой структуре. Обсуждаются механизмы спиновой релаксации и процессы, приводящие к возникновению инверсного спинового эффекта Холла. Вторая глава - «Экспериментальные образцы и методы их исследования», в ней дается описание исследуемых образцов и методов их получения, приведена методика расчета скоростей спиновой релаксации методом непрерывного насыщения ЭПР линии и импульсным методом, а также представлена техника эксперимента.

Третья глава названа «Исследование поведения мелкого донорного центра фосфора в объемных кристаллах $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ методом электронного спинового резонанса» и в ней исследована сверхтонкая структура спектра донорного электрона, дающая информацию о плотности волновой функции донора в основном состоянии на ядре ^{31}P ($I = 1/2$), а также температурные зависимости скорости спиновой релаксации ($T = 3,5\text{--}30\text{ K}$), позволившие анализировать механизм релаксации продольной компоненты T_1 и определить величину долин-орбитального расщепления состояния донора.

В Четвертой главе исследовано поведение доноров лития в объемных монокристаллических моноизотопных сплавах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x = 0,0039\text{--}0,05$), обогащенных бесспиновыми изотопами (^{28}Si (99,998%) и ^{72}Ge (99,984%)), методом ЭПР. Основные результаты этого раздела можно сформулировать так: показано, что основное состояние лития в изотопно-чистом $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$, также как и в кремнии, не является синглетным, в отличие от доноров V группы, что объясняет отсутствие в спектрах ЭПР линий СТВ с ядерным спином донора, характерных для центра в синглетном состоянии. В $^{28}\text{Si}_{1-x}^{72}\text{Ge}_x$ при $x < 3$ ат. %, легированном литием, парамагнитные центры лития проявляют аксиальную (тригональную) симметрию с главной осью g-фактора параллельной направлению [111] кристалла. Понижение симметрии по сравнению с чистым кремнием обусловлено наличием в решетке атомов германия.

В пятой главе анализируются процессы генерации и детектирования спиновых токов в структурах ферромагнетик/Si с модифицированным спин-орбитальным взаимодействием за счет легирования тяжелой примесью: висмутом и сурьмой. Основные результаты этой главы можно сформулировать следующим образом. В рамках общепринятой модели спиновой накачки проведены расчеты зависимости напряжения обратного спинового эффекта Холла от параметров слоев кремния, легированных различными донорами. Объяснено отсутствие полезного сигнала на шумовом фоне в эксперименте, когда слой кремния легирован только фосфором или сурьмой. Причиной является малый спин-орбитальный вклад в рассеяние и малый спиновый угол Холла для сурьмы и фосфора по сравнению с тяжелыми донорами, такими как висмут. Показано, что в структуре $\text{P}_y/n\text{-Si:Bi:P}$, в которой Si легирован P и тяжелым донором Bi, процесс спинового рассеяния с

переворотом спина приводит к немонотонной зависимости напряжения обратного спинового эффекта Холла от концентрации тяжелого донора с сильной спин-орбитальной связью. Это объяснено большей вероятностью рассеяния с переворотом проекции спина электрона и уменьшением длины спиновой диффузии с увеличением концентрации висмута.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов, представленных в диссертационной работе, обеспечиваются использованием современного научного оборудования, совокупностью хорошо апробированных экспериментальных и расчетных методов исследования, корректных теоретических представлений при анализе и интерпретации полученных экспериментальных результатов, а также воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались на ведущих российских и международных конференциях по физике полупроводников и спиновой физики.

При изучении диссертационной работы возникло несколько вопросов.

1. На рисунке 3 (стр. 18) для спектра ЭПР кремния, содержащего фосфор, приведено две четко выраженные линии и между ними еще две. В подписи к рисунку пояснений нет.
2. Не понятна фраза (стр. 27) «В диссертации эта проблема решается легированием кремния одновременно двумя донорами ...». Изготовление образцов не заявлено в целях работы и результаты соискателя в разделе исследования спиновых токов связаны с численными расчетами по известным формулам и количественной оценке наблюдавшихся эффектов. Некоторое пояснение причин включения результатов расчетов токов, возникающих при СХЭ и ИСХЭ приведено на стр.36.
3. Указано, что ФМР регистрируется за счет магнитных переходов (стр. 45). А спектры ЭПР тоже сняты за счет магнитных переходов и какова роль электродипольных переходов в исследуемых образцах и установках?
4. Указано, что разумно предположить, что $T_2 > T_1$ (стр. 52). Если это не опечатка, то надо пояснять. Из текста неясно, о каких временах идет речь: о T_2 или T_1 (стр.70). Если обсуждается зависимость от температуры, то это T_1 , если ширина линий, то это T_2 .
5. Выражение (41) позволяет оценить величину деформации вблизи дефекта за счет атомов германия (стр.53). Эта величина относительно большая. Поскольку величины констант деформационного потенциала в зоне проводимости кремния порядка 10 эВ, то такие деформации могут приводить к расщеплению состояний T и E порядка 1 мэВ, что сравнимо с расщеплением спиновых подуровней в магнитном поле. Это может значительно изменить форму линий ЭПР. По моему мнению, деформации должны быть на порядок меньше, необходимо дать пояснение.

Эти замечания не являются принципиальными, а скорее уточняющими и не снижают общую оценку работы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и работ, вошедших в нее. Считаю, что диссертационная работа «Магнитно-резонансные исследования поведения доноров в кристаллах Si и $Si_{1-x}Ge_x$ с модифицированным изотопным составом и спин-орбитальным взаимодействием» полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата


физико-математических наук, соискатель Калинина Екатерина Александровна заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - Физика полупроводников.

Официальный оппонент
Доктор физ.-мат. наук, профессор,
главный научный сотрудник,
зав. сектором ФТИ им. А.Ф. Иоффе
averkiev@les.ioffe.ru
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, дом 26
194021

15 мая 2026 года

 Никита Сергеевич Аверкиев

Подпись Н.С. Аверкиева подтверждаю:
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе
кандидат физ.-мат. наук

 М.И. Патров

