

На правах рукописи

СУХОРУКОВ Андрей Владимирович

**ИЗОТОПИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СПИНОВОМ РЕЗОНАНСЕ  
ЭЛЕКТРОНОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ЛОКАЛИЗАЦИИ В  
КРЕМНИИ**

*Специальность 01.04.10 – Физика полупроводников*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена на кафедре физики полупроводников и оптоэлектроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Ежевский Александр Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник  
Тетельбаум Давид Исаакович

доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Андреев Борис Александрович

**Ведущая организация:** Казанский федеральный университет, г.Казань

Защита состоится «17» октября 2012 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д.212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан «    » сентября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.166.01,  
доктор физико-математических наук, профессор

А.И. Машин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Интерес к исследованию свойств моноизотопных монокристаллов кремния возник еще в 50-е годы прошлого столетия [1], когда были получены первые образцы кремния, обогащенного изотопом  $^{28}\text{Si}$  чуть более 99.8%. Однако эти исследования, несмотря на то, что кремний до сих пор самый востребованный полупроводник в микроэлектронике, не продолжались практически до начала нового столетия.

В последние годы интенсивно исследовались изотопические эффекты, связанные с изменением массы, которые приводят к смещениям и перенормировкам спектра частот фононов в кристаллах и, как следствие, к изменению энергий электрон-фононных переходов и уширению электронных переходов [2]. Известно, что изотопический беспорядок масс в кристаллах вызывает локальные изменения энергетической щели в кристалле и приводит [3-5] к неоднородному уширению спектров поглощения мелких примесей, а также спектров фотолюминесценции связанных на мелкой примеси экситонов, переходов [6]. В спиновом резонансе электронов, такие эффекты должны проявляться в процессах спин-решеточной релаксации вследствие взаимодействия спинов с фононами [7,8], и исследованы далеко не полностью. Другой тип эффектов, вызванных изменением содержания изотопа  $^{29}\text{Si}$ , обладающего ядерным спином связан со сверхтонким взаимодействием спина электрона со спином ядер  $I=1/2$  изотопа  $^{29}\text{Si}$ . Эти эффекты, прежде всего, приводят к неоднородному уширению спектров ЭПР и значительно снижают разрешающую способность метода, в результате чего скрываются детали спектра, что затрудняет их интерпретацию и расшифровку электронной структуры центров. В кремнии, несмотря на большую по сравнению с AlB5 изученность дефектов, еще остается много нерешенных задач в исследованиях электронной структуры как глубоких, так и мелких центров. Обсуждаемые в литературе [9] модели квантовых компьютеров, с использованием кремния,

обогащенного бесспиновым изотопом Si-28, также стимулировали исследования свойств моноизотопных материалов.

Развитие спинтроники [10] стимулировало другую важную проблему, связанную с поведением электронов проводимости в изотопно-чистых кристаллах по сравнению с природными. Электронный спиновый резонанс позволяет изучать процессы спиновой релаксации электронов проводимости, связанные с индуцированным рассеянием на донорах и фононах изменением спин-орбитального взаимодействия. Эти эффекты важны при высоких концентрациях доноров и высоких температурах. При малых концентрациях доноров должны проявляться спиновые изотопические эффекты, связанные с рассеянием электрона на магнитных ядрах изотопа  $^{29}\text{Si}$  за счет сверхтонкого (в основном Ферми-контактного) взаимодействия. Эти эффекты экспериментально не исследованы в кремнии, а теоретические модели [11,12] не точно описывают эти вклады. Для того чтобы определить роль сверхтонких взаимодействий в спиновой релаксации электронов проводимости необходимо точно учитывать спин-орбитальные (примесный и решеточный) вклады. Однако механизмы Эллиота-Яфета, применяемые для этих целей, лишь качественно объясняют поведение скоростей спиновой релаксации, но количественное расхождение достаточно велико. Причины расхождений экспериментальных оценок с теоретическими можно понять при тщательном исследовании поведения отклонений g-фактора электронов проводимости в кристалле от  $g_0$  для свободного электрона в зависимости от химической природы донора его концентрации и температуры. Анализ этих данных позволит откорректировать теоретические модели, учитывающие примесные и решеточные спин-орбитальные вклады.

## **Цели и основные задачи работы**

Цель работы: изучение процессов спиновой релаксации электронов с различной степенью локализации в кремнии с изменённым изотопным составом.

Задачи работы:

1. Исследование особенностей спектров спинового резонанса электронов локализованных на мелких донорах фосфора и лития в кремнии, обогащенном изотопами  $^{28}\text{Si}$  (более 99.99%) и  $^{29}\text{Si}$  (более 99.9%).
2. Изучение поведения спинов электронов проводимости и процессов спиновой релаксации электронов проводимости при рассеянии их на примесях, фононах и магнитных ядрах изотопа  $^{29}\text{Si}$ .
3. Определение вклада сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии.

### **Научная новизна работы**

В моноизотопном кремнии  $^{28}\text{Si}$  впервые получены и исследованы спектры электронного парамагнитного резонанса изолированного донорного центра лития и комплекса LiO. Показано, что обогащение кремния бесспиновым изотопом приводит к существенному сужению резонансных линий, позволяющему наблюдать тонкую и сверхтонкую структуру спектров.

Впервые показано, что зависимость g-фактора от температуры в моноизотопном кремнии n-типа отражает степень локализации электрона на доноре. Характер температурной зависимости g-фактора электронов в зоне проводимости определяется модуляцией решеточного спин-орбитального взаимодействия фононами.

Впервые получена зависимость вклада сверхтонкого взаимодействия в ширину линии спектра электронного парамагнитного резонанса электронов проводимости в кремнии от концентрации магнитных ядер. Определена величина вклада сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии.

### **Практическая ценность работы**

Результаты, полученные в данной работе, способствуют более детальному пониманию процессов спиновой релаксации как локализованных, так и свободных электронов в кремнии и могут быть полезны при конструировании

приборов спинтроники.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Изотопическое обогащение кремния приводит к значительному сужению линий электронного парамагнитного резонанса лития в кремнии от  $\Delta B_{pp}=0.141\pm 0.001$  мТл для природного кремния до  $\Delta B_{pp}=0.013\pm 0.001$  мТл для отдельных компонент спектра в моноизотопном кремнии  $^{28}\text{Si}$ , что даёт возможность более детального исследования тонкой и сверхтонкой структуры спектров электронного парамагнитного резонанса доноров в кремнии.
2. Поведение температурной зависимости g-фактора в кремнии n-типа более точно отражает степень зарядовой делокализации электрона, по сравнению с данными проводимости и эффекта Холла. Температурная зависимость g-фактора электронов проводимости в s-зоне определяется модуляцией решеточного спин-орбитального взаимодействия фононами.
3. Вклад сверхтонкого взаимодействия в ширину линии электронного парамагнитного резонанса электронов проводимости в кремнии составляет:  $0.007\pm 0.001$  мТл для природного образца кремния и  $0.018\pm 0.001$  мТл для моноизотопного кремния-29. При низких концентрациях магнитных ядер  $^{29}\text{Si}$  вклад сверхтонкого взаимодействия зависит от доли магнитных ядер в степени  $1/3$  и согласуется с моделью Першина-Привмана, при высоких концентрациях зависимость описывается степенью  $2/3$ .

**Личный вклад автора**

Автором внесён определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов от приготовления образцов и проведения измерений до анализа экспериментальных результатов с применением специальных программ по расчёту параметров спектров ЭПР методом

спинового гамильтониана. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем работы проф. А.А. Ежевским.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались на международной конференции «Euromag-2008» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.), 25 Международной конференции «Дефекты в полупроводниках / ICDS-25» (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), 30 международной конференции «ICPS-30» (г. Сеул, 2010 г.) VII международной конференции «Кремний 2010» (г. Нижний Новгород, 2010 г.), XI, XIII, XV симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 2007, 2009, 2011 г.), 5, 6, 7 Зимних молодежных школах-конференциях «Магнитный резонанс и его приложения» (г. Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010 г.), Всероссийской молодежной конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. Санкт-Петербург, 2009 г.), XI, XII Международных молодежных научных школах «Актуальные проблемы магнитного резонанса и его приложений» (г. Казань, 2007, 2009 г.), XV Нижегородской сессии молодых учёных (г. Нижний Новгород, 2010),

### **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликованы 41 научных работ: 8 статей, входящих в перечень ВАК, и 33 публикации в материалах международных и всероссийских конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения и пяти глав. Объем диссертации составляет 120 страниц, содержащих 52 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 99 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность направления исследований, описано состояние проблемы, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации приводятся возможности спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) как метода исследования, описаны основы явления электронного парамагнитного резонанса.

Обзор литературных данных продолжается анализом работ о роли изотопических эффектов в методе ЭПР. Выделяются два основных типа изотопических эффектов. Эффекты первого типа, связаны с распределением плотности неспаренных электронов парамагнитных центров в кристалле по лигандным атомам кремния, имеющим в своём составе изотоп  $^{29}\text{Si}$ . Другой изотопический эффект – изменение ширины линии поглощения за счет процессов спин-решеточной релаксации.

Часть первой главы посвящена механизмам спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии. Отдельное внимание уделяется процессам спиновой релаксации с участием сверхтонких взаимодействий и приводятся известные на данный момент модели.

**Вторая глава** посвящена методике эксперимента, технике спектроскопии ЭПР, описанию исследованных образцов. Спектры электронного парамагнитного резонанса в работе измерялись на гомодинном спектрометре X-диапазона BRUKER-EMXplus-10/12 с гелиевым криостатом и системой контроля температуры (3.8–300 K) ER 4112 HV, поэтому приводятся характеристики прибора, гарантирующие условия эксперимента, при которых параметры спектров ЭПР исследованных образцов измеряются с высокой точностью.



Исследования проводились на образцах кремния с различным изотопным составом, различным содержанием примеси, различной химической природой примеси. В ходе диссертационного исследования использовались образцы высокочистого кремния с обогащением 99,99% (по изотопу  $^{28}\text{Si}$ ) и 99,9% (по изотопу  $^{29}\text{Si}$ ), выращенные в институте химии высокочистых веществ РАН им. Г.Г. Девятовых методом бестигельной зонной плавки. Так же использовались промышленные образцы кремния с природной композицией изотопов.

Легирование мелкой донорной примесью фосфора с концентрациями от  $10^{16}$  до  $10^{19}$  ион/см<sup>2</sup> производилось имплантацией ионов с энергией до 40 кэВ и током ионов до 0,5 мА с погрешностью набора дозы менее 10% и с энергией до 100 кэВ и током ионов до 0,3 мА с погрешностью набора дозы менее 5%). Для имплантации ионов использовались ионные ускорители в НИФТИ ННГУ. При легировании кремния донорной примесью лития применялся метод диффузии, основанный на работе [13].

**Третья глава** посвящена исследованиями структуры состояний электронов, локализованных на мелких донорах лития и фосфора в моноизотопном кремнии.

В моноизотопном кремнии-28 с концентрацией лития  $N_{\text{Li}} \sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> при температурах 3,5-20К был получен спектр ЭПР тригональной симметрией g-фактора с хорошо разрешенной сверхтонкой структурой обусловленной взаимодействием неспаренного электрона на литии с ядерным спином  $^7\text{Li}$ . Исследование угловой зависимости спектров показало, что тригональная симметрия ( $g \parallel [111]$ ) линий спектра, соответствует электрону, локализованному на связи LiO. В таком центре и литий и кислород находятся в ближайших тетраэдрических междоузлиях. Поэтому связь ориентирована вдоль направления [111], что обуславливает главную компоненту g-фактора вдоль тригональной оси.

В моноизотопном кремнии-28 с содержанием лития  $N_{\text{Li}} \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> присутствуют два типа линий: спектр с тригональной симметрией g-фактора, аналогичный спектру образцов с малой концентрацией и тетрагональной

симметрией g-фактора, состоящий из двух линий. Тетрагональная симметрия g-фактора при концентрации лития  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  связана с изолированным донорным центром Li.

В образцах кремния, облученных ионами фосфора, природного изотопного состава и обогащенного изотопом  $^{28}\text{Si}$ , обнаружен анизотропный спектр ЭПР при  $T=4\text{K}$ . Спектр состоял из трех линий соответствующих различным компонентам g-фактора,  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ . Были исследованы зависимости параметров анизотропии от температуры и величины микроволнового поля при постоянной температуре. Анализ анизотропного спектра ЭПР при низких температурах, для кремния, обогащенного изотопом Si-28 и природного, легированного фосфором, показал сильную зависимость g-факторов от температуры и СВЧ мощности. Предложена модель, объясняющая зависимость анизотропии от температуры и уровня микроволновой мощности. Модель связывает изменение степени локализации электрона с увеличением частоты случайных флуктуаций локальных полей за счет движения с ростом температуры и микроволновой мощности. Предполагается, что анизотропия спектра вызвана упругими напряжениями при образовании кластеров фосфора, так как известно, что фосфор имеет такую способность.

В **четвёртой** главе исследуется изменение релаксационного вклада в ширину линии ЭПР электронов проводимости в кремнии, а также g-фактора в зависимости от химической природы и концентрации мелкой донорной примеси в кремнии, температуры и величины микроволнового поля.

Необходимо было найти условия, при которых вклады механизмов релаксации при рассеянии на примеси и фононах были минимальны. Исследования проводились на образцах кремния, как с природным содержанием изотопов, так и образцы кремния, обогащенного изотопом  $^{28}\text{Si}$  и  $^{29}\text{Si}$ . Проводилось легирование образцов кремния с различной концентрацией примеси от  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  до  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  и различной химической природой примеси Li, N, P, As, Sb, Bi. Такой широкий диапазон концентраций и примесей позволил понять, какие механизмы релаксации важны, найти тот интервал

температур и концентраций, в котором можно измерить вклад сверхтонкого взаимодействия с максимальной точностью.

Отдельное внимание уделяется поведению температурной зависимости  $g$ -фактора электронов проводимости, содержащем информацию о степени зрядовой делокализации электрона и спин-орбитальном взаимодействии. Предложена модель изменения  $g$ -фактора электронов проводимости в кремнии от температуры, основанная на изменении решеточного спин-орбитального вклада с температурой.

В Пятой главе исследуется вклад сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии. При сравнении экспериментальной зависимости вклада СТВ в ширину линии электронов проводимости с моделью Першина-Привмана наблюдается расхождение в области больших концентраций магнитных ядер изотопа  $^{29}\text{Si}$ . Причиной

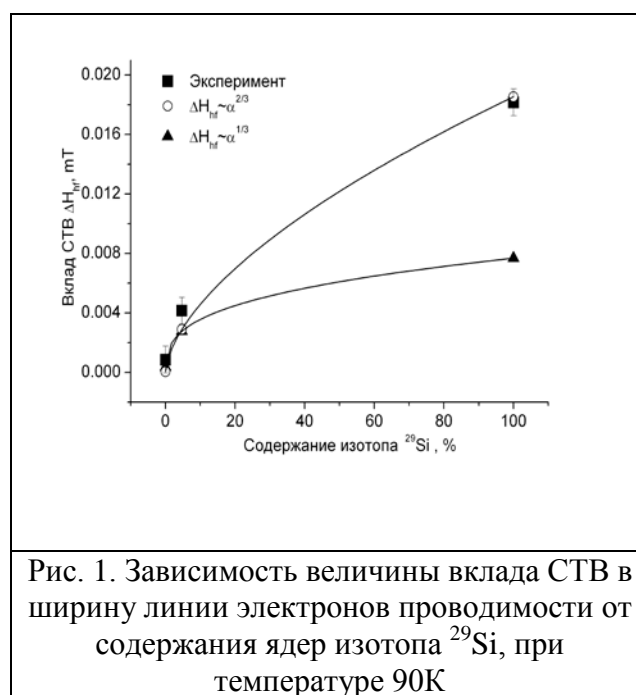


Рис. 1. Зависимость величины вклада СТВ в ширину линии электронов проводимости от содержания ядер изотопа  $^{29}\text{Si}$ , при температуре 90К

расхождения является то, что в модели Першина-Привмана учитывается взаимодействие волнового пакета электрона только с одним магнитным ядром. Модель, представленная в работе, учитывает взаимодействие с несколькими ядрами, обладающими магнитным моментом, и совпадает с экспериментом в пределах погрешности. Длина волнового пакета электрона является единственным параметром модели  $\lambda$ . Наилучшее совпадение расчёта с экспериментом происходит при величине  $\lambda = 1.7a$ , где  $a$  – параметр решётки кремния, что подтверждает взаимодействие волнового пакета электрона с несколькими ядрами  $^{29}\text{Si}$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые получен ЭПР спектр лития с высоким разрешением в моноизотопном кремнии, обогащённом изотопом  $^{28}\text{Si}$  с очень узкими отдельными линиями сверхтонкой структуры без приложения внешнего напряжения. В моноизотопном кремнии обогащенном изотопом  $^{28}\text{Si}$  с малой концентрацией лития наблюдается тригональная симметрия ЭПР спектра комплекса LiO с хорошо разрешённой сверхтонкой структурой  $^7\text{Li}$  при температурах 3,5-20К. При высокой концентрации лития в кремнии-28 тригональный спектр комплекса LiO наблюдается вместе с тетрагональным спектром, с неразрешенной сверхтонкой структурой. Предполагается, что тетрагональная симметрия g-фактора при концентрации лития  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  связана с изолированным донорным центром Li.
2. Анизотропный спектр ЭПР в эпитаксиальных слоях моноизотопного кремния-28 и природного изотопного состава связан с электронами, локализованными на донорных центрах фосфора, находящихся в напряженных кластерах фосфора. Сильная чувствительность анизотропии к температуре и микроволновой мощности связана с температурной зависимостью рассеяния электронов, участвующих в проводимости по примесной зоне, на нейтральной донорной примеси, уменьшающего время жизни спинового состояния и приводящего к разрушению анизотропии по механизму Андерсона. Большую анизотропию и ее более значительную чувствительность к температуре и СВЧ полю в моноизотопном кремнии по сравнению с природным можно объяснить, по-видимому, различием в рассеянии фононов, отводящих энергию от разогретых полем электронов к решетке, на изотопическом беспорядке. Высокая чувствительность спектров к электромагнитному микроволновому полю, приводящему к разогреву

носителей, позволяет управлять спиновыми состояниями, что является актуальной задачей спинтроники.

3. Процессы спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии обусловлены сильными механизмами Эллиотта-Яфета во всём исследованном интервале температур: от температуры жидкого гелия до комнатной. При низких температурах ( $4.3 < T < 90$ ) согласно механизмам Эллиотта-Яфета спиновая релаксация обусловлена рассеянием электронов на примеси. При температурах  $T \geq 90\text{K}$  кроме механизма рассеяния на примеси в процессы спиновой релаксации существенный вклад вносит электрон-фононное взаимодействие, а при высоких концентрациях донора и электронов в зоне проводимости электрон-электронное взаимодействие. В интервале температур  $T > 240\text{K}$  становится заметным междолинное электрон-фононное взаимодействие.
4. Сильное влияние на поведение электронов проводимости и, соответственно, процессы спиновой релаксации оказывает спин-орбитальное взаимодействие при рассеянии электронов на примеси. Об этом говорит зависимость ширины и  $g$ -фактора линии ЭПР электронов проводимости от концентрации и атомного номера примеси. Чем больше у примеси константа спин-орбитального взаимодействия, тем больший вклад в ширину линии ЭПР электронов проводимости вносит спин-орбитальное взаимодействие при рассеянии на примеси.
5. В исследованном диапазоне температур и концентраций примеси процессы релаксации, обусловленные сверхтонким взаимодействием, могут наблюдаться при низких температурах  $T < 80\text{K}$ . Однако в таком интервале температур происходит локализация электронов на примеси, либо при больших уровнях легирования электроны участвуют в прыжковой проводимости.
6. Температурная зависимость  $g$ -фактора в кремнии  $n$ -типа отражает степень зарядовой делокализации электрона. По сравнению с данными

проводимости и эффекта Холла  $g$ -фактор более точно отражает степень делокализации электрона

7. Для исследования процессов релаксации, обусловленных сверхтонким взаимодействием, электронов, находящихся в зоне проводимости, необходимы образцы кремния с низкими концентрациями примеси и высоким содержанием ядерных спинов изотопа  $^{29}\text{Si}$ , интервал температур, ограниченный снизу областью локализации электронов на доноре, а сверху – рассеянием электрона на фононах и примеси.
8. При температурах около 90К и при концентрации доноров на уровне  $4\text{--}6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  вклад сверхтонких взаимодействий с ядрами  $^{29}\text{Si}$  в спиновую релаксацию электронов, находящихся в зоне проводимости в кремнии оказывается заметным на фоне механизмов связанных с рассеянием электронов на примеси и фононах.
9. Для электронов проводимости в кремнии впервые определен вклад сверхтонкого взаимодействия спина электрона с ядерным спином изотопа. Величина вклада сверхтонкого взаимодействия зависит от концентрации магнитных ядер. Сравнение экспериментальной зависимости величины вклада сверхтонкого взаимодействия от концентрации изотопа  $^{29}\text{Si}$  с моделью Першина-Привмана показало хорошее соответствие только для области малых концентраций ядер, когда волновой пакет электрона взаимодействует только с одним магнитным ядром. При увеличении концентрации магнитных ядер необходимо учитывать взаимодействие с несколькими магнитными ядрами  $^{29}\text{Si}$ . Такая модель показала хорошее согласие с экспериментом.
10. Вклад сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии значительно меньше вклада от механизма Эллиотта-Яфета, определяющийся индуцированным решеткой вкладом спин-орбитального взаимодействия в состоянии электронов одновременно с рассеянием электронов на примеси и фононах.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feher, G. Electron spin resonance experiments on donors in silicon. 1 Electronic structure of donors by ENDOR technique / G. Feher // Phys. Rev. – 1959 – Vol. 114 – P. 1219.
2. Cardona, M. Isotope effects on the optical spectra of semiconductors / M. Cardona, M.L.W. Thewalt // Rev. Mod. Phys. – 2005 – Vol. 77 – P. 1173.
3. Steger, M. Shallow impurity absorption spectroscopy in isotopically enriched silicon / M. Steger, A. Yang, D. Karaiskaj, et al., // Phys. Rev. B. – 2009 – Vol.79 – P. 205210.
4. Thewalt, M.L.W. Direct observation of the donor nuclear spin in a near-gap bound exciton transition:  $^{31}\text{P}$  in highly enriched  $^{28}\text{Si}$  / M.L.W.Thewalt, A. Yang, M. Steger, et al. // J.Appl.Phys. – 2007 – Vol. 101 – P. 081724.
5. Karaiskaj, D. Photoluminescence of Isotopically Purified Silicon: How Sharp are Bound Exciton Transitions? / D. Karaiskaj, M.L.W.Thewalt, T.Ruf, et al. // Phys.Rev.Lett. – 2001 – Vol. 86 – P. 6010-6013.
6. Karaiskaj, D. Impurity Absorption Spectroscopy in  $^{28}\text{Si}$ : the Importance of Inhomogeneous Isotope Broadening / D. Karaiskaj, J.A.H. Stotz, T. Meyer, et al. // Phys. Rev. Lett. – 2003 – Vol. 90 – P. 186402.
7. Kane, B. E. A silicon based nuclear spin quantum computer / B. E. Kane // Nature (London) – 1998 – Vol. 393 – P. 133–137.
8. Zutic, I. Spintronics: Fundamentals and applications / I. Zutic I., J. Fabian, S. Das Sarma // Reviews of Modern Physics. – Vol. 76 – P. 323-386.
9. Гусейнов, Д.В. Спиновая релаксация электронов, локализованных на мелких и глубоких донорных центрах в кремнии, при различном содержании ядер  $^{29}\text{Si}$  и изменении изотопического беспорядка / Д.В. Гусейнов, Д.В. Хомицкий, А.А. Ежевский, А.В. Гусев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008 – №1 – С.93-97.

10. Ежевский, А.А. Анизотропия донорного состояния электрона на фосфоре в напряженных кластерах в кремнии при низких температурах / А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, А.В. Гусев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010 – №.1 – С.1-6.
11. Anderson, P.W. A Mathematical Model for the Narrowing of Spectral Lines by Exchange or Motion / P.W. Anderson, P.R. Weiss, // J. Phys. Soc. Japan. – 1954 – Vol. 9 – p. 316.
12. Pershin, Y.V. Spin relaxation of conduction electrons in semiconductors due to interaction with nuclear spins / Y.V. Pershin, V. Privman // Nano Letters. – 2003 – Vol. 3 – P. 695.

#### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

- [A1] А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, А.В. Гусев Анизотропия донорного состояния электрона на фосфоре в напряженных кластерах в кремнии при низких температурах Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. N5, 2010, с. 78-84.
- [A2] A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev, S.A. Popkov Electron paramagnetic resonance spectroscopy of lithium donors in monoisotopic silicon Physica B: Physics of Condensed Matter 404 (2009), pp. 5063-5065.
- [A3] А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, О.А. Кузнецов, С. А. Попков, В.Г. Шенгуров, С.А. Денисов Исследование спектров электронного спинового резонанса в SiGe/Si гетерослоях, легированных фосфором Известия РАН. Серия физическая, 2012, том 76, № 2, с. 231–233.
- [A4] A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev, S.A. Popkov V.A. Gavva Spin relaxation and spin-diffusion length of conduction electrons in silicon with different compositions of isotopes ICPS-30 July 25-30.



2010/Coex, Seoul, Korea, AIP Conference Proceeding Series, 1399, pp. 743-744.

- [A5] А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Гусев С. А. Попков  
Процессы спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии с  
различным изотопным составом Вестник ННГУ №5, 2010, с335-338.
- [A6] А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, С. А. Попков Спиновая  
диффузия и релаксация электронов проводимости в кремнии Вестник  
ННГУ №5, 2010, с330-334
- [A7] А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, А.В. Гусев, С. А. Попков  
Спиновый резонанс электронов с различной степенью локализации в  
кремнии с изменённым изотопным составом Вестник ННГУ №5, 2010,  
с321-329
- [A8] А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Гусев, С. А. Попков  
Вклад сверхтонкого взаимодействия в процессы спиновой релаксации  
электронов проводимости в кремнии Вестник ННГУ №3, 2012, с. 36-45
- [A9] A.A. Konakov , A.A. Ezhevskii, A.V. Soukhorukov, D.V. Guseinov, S.A.  
Popkov, V.A. Burdov Temperature dependence of the conduction electron g-  
factor in silicon: theory and experiment Magnetic Resonance in Solids,  
Electronic Journal, Vol. 13, №2, 2011, pp. 14-20
- [A10] A.A. Konakov, A.A. Ezhevskii, A.V. Soukhorukov, D.V. Guseinov,  
S.A. Popkov, V.A. Burdov Lande factor of the conduction electrons in silicon:  
temperature dependence IOP Publishing, London Journal of physics:  
conference series, V. 324, P. 012027
- [A11] A.A. Ezhevskii, S.A. Popkov, A.V. Soukhorukov, D.V. Guseinov, N.V.  
Abrosimov, H. Riemann Investigation of the structure of the ground state of  
lithium donor center in silicon-28 and an impact on it of the internal  
deformation of the crystal (Accept for publishing).
- [A12] Electron paramagnetic resonance of lithium related donors in  
monoisotopic silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov,  
A.V. Gusev, S.A. Popkov // 7th European Federation of EPR Groups

Meeting and Closing Meeting of COST P 156-11 September 2009 Antwerp, Belgium, p.70

- [A13] Electron paramagnetic resonance spectroscopy of lithium donors in monoisotopic silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev // Defects in Semiconductors, ICDS-25 July 20-24, 2009 St. Petersburg, Russia, p.176
- [A14] Анизотропия донорного состояния электрона на фосфоре в напряженных кластерах в кремнии при низких температурах. / А.А. Ежевский, А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, А.В. Гусев // Материалы XIII симпозиума «Нанопизика и наноплектроника». Нижний Новгород, 16-20 марта 2009 г. С 129-130.
- [A15] Isotopic effects in EPR line broadening and spin-relaxation for deep and shallow centers in silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, C.A.J. Ammerlaan. // Proceedings of International Conference «Euromar-2008». July 2008, St. Petersburg, Russia.
- [A16] Isotopic effects in spin-lattice relaxation for deep  $\text{Cr}^+$  center and dangling bonds in silicon. / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev // Proceedings of International Conference «Euromar-2008». July 2008, St. Petersburg, Russia.
- [A17] Spin relaxation processes of conduction electrons in silicon with different isotopic composition. / A.A. Ezhevskii, A.V. Soukhorukov, D.V. Guseinov // Proceedings of International Conference «Euromar-2008». July 2008, St. Petersburg, Russia.
- [A18] Spin relaxation processes of conduction electrons in silicon with different isotopic composition / A.V. Soukhorukov, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov // Proceedings of XII International Youth Scientific School "Actual Problems of magnetic resonance and its application" 5-9 October 2009. Kazan. P. 146-149
- [A19] Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса лития в моноизотопном кремнии / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов

// 6-ая Зимняя молодежная школа-конференция «Магнитный резонанс и его приложения» Санкт-Петербург, 30 ноября-04 декабря 2009, с. 113-115

[A20] Механизмы спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии с изменённым изотопным составом / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов // Сборник тезисов XI Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике Санкт-Петербург, 30 ноября-4 декабря 2009 г. с. 6

[A21] Spin relaxation of conduction electrons in ion implanted layers of Si with modified isotopic composition. / A.V. Soukhorukov, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov // Proceedings of XI International Youth Scientific School "Actual Problems of magnetic resonance and its application" 23-28 September 2007. Kazan. P. 94-97

[A22] Вклад различных механизмов в спиновую релаксацию электронов проводимости в кремнии с различным изотопным составом / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, Д.В. Хомицкий, А.В. Гусев // Материалы XI симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника». Нижний Новгород, 10-14 марта 2007 г. С 222-223.

[A23] Влияние изотопного состава кремния на поведение спинов электронов сильно и слабо локализованных на дефектах и электронов проводимости / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, А.В. Сухоруков, Д.В. Хомицкий, О.А. Кузнецов, А.В. Гусев // XIII Конференция «Высокоочищенные вещества и материалы, получение, анализ, применение». Тезисы докладов. Нижний Новгород, май 2007.

[A24] Contribution of hyperfine interaction with magnetic nuclei of  $^{29}\text{Si}$  isotope to the line width and spin relaxation for deep and shallow donor centers and conduction electrons in silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, D.V. Khomitsky, O.A. Kuznetsov, A.V. Gusev, C.A.J. Ammerlaan // Proceedings of International Conference «EastMag-2007» 23-26 August 2007. Kazan.

- [A25] Процессы спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии с различным изотопным составом / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов // Материалы 5-ой, зимней молодежной школы-конференции «Магнитный резонанс и его приложения», Санкт-Петербург, 1-5 декабря 2008г.
- [A26] Механизмы спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии с изменённым изотопным составом. / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов // Материалы IV Международной научно-технической школы-конференции 8-12 декабря 2008 г., г. Москва, МИРЭА, с. 60-63.
- [A27] Изменение процессов релаксации спинов оборванных связей при модификации кремния ионной бомбардировкой. / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, С.А. Яшанин, А.В. Сухоруков, // II Всероссийская конференция «Физические и физико-химические основы ионной имплантации ФФХОИИ-2008», 28-31 октября 2008 г. Казань. КФТИ, Тезисы докладов. С. 94-95.
- [A28] The dependence of the contribution of the hyperfine interaction in the spin relaxation rate of conduction electrons in silicon on the silicon isotope composition / A.V. Soukhorukov, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, S.A. Popkov, A.V. Gusev, V.A. Gavva // Abstracts of VII International Conference «Silicon-2010», 6-9 July 2010, Nizhny Novgorod, P. 135.
- [A29] The electronic g-factor as a function of temperature, concentration and chemical nature of the donor in silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, S.A. Popkov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev, V.A. Gavva // Abstracts of VII International Conference «Silicon-2010», 6-9 July 2010, Nizhny Novgorod, P.136.
- [A30] Isotopic effects in electron spin resonance with varying degrees of localization in silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, S.A. Popkov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev, V.A. Gavva // Abstracts of VII International Conference «Silicon-2010», 6-9 July 2010, Nizhny Novgorod, P.137.

- [A31] The high-resolution EPR spectra of Fe<sup>0</sup> center in <sup>28</sup>Si isotope enriched silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, S.A. Popkov, A.V. Soukhorukov, A.V. Gusev, V.A. Gavva // Abstracts of VII International Conference «Silicon-2010», 6-9 July 2010, Nizhny Novgorod, P.139.
- [A32] Вклад сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в кремнии с изменённым изотопным составом / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов С.А. Попков // Тезисы XV нижегородской сессии молодых учёных, 19-23 апреля 2010, Нижний Новгород, с. 90
- [A33] Вклад сверхтонкого взаимодействия в скорость спиновой релаксации электронов проводимости в зависимости от изотопного состава кремния / А.В. Сухоруков, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов С.А. Попков, А.В. Гусев // 7-ая Зимняя молодежная школа-конференция «Магнитный резонанс и его приложения» Санкт-Петербург, 29 ноября-04 декабря 2010, с. 192-194.
- [A34] Исследование спектров электронного спинового резонанса в SiGe/Si гетерослоях, легированных фосфором / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов С.А. Попков, А.В. Сухоруков, О.А. Кузнецов, В.Г. Шенгуров, С.А. Денисов // Труды XV международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 г. С 60-61.
- [A35] Temperature dependence of the conduction electron g-factor in silicon / A.A. Konakov, V.A. Burdov, A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, S.A. Popkov // XIV International Youth Scientific School “Actual problems of magnetic resonance and its application”. Program. Lecture Notes. Proceedings (Kazan, 20-25 June 2011), P. 120-123, Kazan University (2011).
- [A36] Electron g-factor in silicon: temperature dependence / A.A. Konakov, V.A. Burdov, A.A. Ezhevskii, A.V. Soukhorukov, D.V. Guseinov, S.A. Popkov // International Conference “Resonances in condensed matter” devoted

to the centenary of Professor S. A. Altshuler. Book of Abstracts (June 21-25, 2011, Kazan, Russia), P. 93.

- [A37] Spin diffusion and relaxation of conduction electrons in silicon / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, S.A. Popkov // Abstracts of VIII International Conference «Silicon-2011», 5-8 July, Moscow, P.91.
- [A38] On the nature of the EPR spectra of  $^{28}\text{Si}$  isotope enriched silicon doped with iron / A.A. Ezhevskii, D.V. Guseinov, A.V. Soukhorukov, S.A. Popkov, V.A. Gavva // Abstracts of VIII International Conference «Silicon-2011», 5-8 July, Moscow, P.207.
- [A39] Исследование мелкого донорного центра лития в кремнии, обогащенном изотопом кремния-28 / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, С.А. Попков, А.В. Сухоруков, Н.В. Абросимов // Тезисы докладов 13 всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто-и наноэлектронике, 21-25 ноября 2011, Санкт-Петербург, с.88
- [A40] Исследование структуры основного состояния донорного центра лития в кремнии-28 и влияния на нее внутренних деформаций кристалла / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, С.А. Попков, А.В. Сухоруков, Н.В. Абросимов Н. Riemann // Материалы XI симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 г. С 247-248.
- [A41] Температурная перенормировка g-фактора электронов проводимости в кремнии / А.А. Конаков, В.А. Бурдов, А. А Ежевский, , А.В. Сухоруков, Д.В. Гусейнов, С.А. Попков // Материалы XI симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 12-16 марта 2012 г. С. 271.