

На правах рукописи

Гусейнов Давуд Вадимович

**ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАРАМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС
ДЕФЕКТОВ И ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ С РАЗЛИЧНЫМ
ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2007 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Ежевский А.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Штельмах К.Ф.

доктор физико-математических наук,
профессор Демидов Е.С.

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН (Н. Новгород)

Защита состоится 16 мая 2007 г. в 14.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.01 при Нижегородском государственном
университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23/3, НИФТИ.

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

Автореферат разослан «14» апреля 2007 г.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23/3, НИФТИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.166.01

доктор физико-математических наук, профессор



А.И. Машин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Кремний, наиболее изученный и применяемый в микроэлектронике полупроводник, в последнее время, благодаря интенсивным исследованиям совершенно новых свойств квантоворазмерных структур и дефектно-примесной люминесценции, сделал значительный шаг в сторону применения в оптоэлектронике, где он существенно проигрывал традиционным прямозонным полупроводникам. Следующим существенным шагом в совершенствовании его фундаментальных свойств и развитии “кремниевых технологий” является переход к монокристаллам высокочистого моноизотопного кремния, состоящего преимущественно из одного устойчивого изотопа. В связи с быстрым прогрессом микро- и наноэлектроники, а также спинтроники, увеличением быстродействия и миниатюризации элементов микросхем ряд параметров кремния, зависящих от его изотопного состава уже не удовлетворяют возрастающим требованиям. Так, например, присутствие в кремнии нескольких стабильных изотопов существенно уменьшает его теплопроводность, что вызывает трудности с отводом тепла, выделяющегося при работе быстродействующих микроэлектронных структур. Применение моноизотопного кремния, обладающего более высокой теплопроводностью, позволит преодолеть эти трудности. Моноизотопный кремний обладает и совершенно новыми свойствами, использование которых может привести к разработке качественно новых устройств спинтроники, способных обеспечить революционный прорыв в информационных технологиях, созданию компьютеров нового поколения. Так, моноизотопный кремний-28, ядро которого обладает нулевым спином, может быть основой для создания квантовых компьютеров. Комплексное исследование свойств моноизотопного кремния позволит получить новые фундаментальные знания в области физики твердого тела и физики полупроводников, изучить влияние изотопного состава на свойства этого важнейшего полупроводника, открыть новые сферы применения моноизотопного кремния. Нам представляется, что в основе наиболее существенных изотопических эффектов должны быть эффекты, связанные с взаимодействием электронных спинов со спином ядра с массовым числом 29, а также эффекты, обусловленные взаимодействием электронов с фононами, на распределение которых существенное влияние оказывает изотопическое разупорядочение решетки. Очевидно, что эти эффекты должны проявляться в тепловых, оптических и магнитных свойствах твердых тел и могут быть заметны при измерении теплопроводности, ЭПР и оптических спектров. Однако наиболее ярко изотопические эффекты наблюдаются в ЭПР спектрах, поскольку в них проявляются как спин-спиновые так и спин-фононные взаимодействия. Применение бесспинового моноизотопного кремния ^{28}Si в спектроскопии ЭПР позволит существенно повысить разрешающую способность метода, благодаря значительному сужению линий спектра. Как показал анализ

литературных данных, изотопические эффекты в кремнии методом ЭПР исследовались мало и достаточно однобоко. Преимущественно рассматривались спиновые изотопические эффекты, в которых действуют только изотопы с не нулевым спином, при этом влияние изотопного состава на процессы спин-решеточной релаксации вообще не исследовалось.

Научная новизна работы

1. Изучена зависимость вклада суперсверхтонкого взаимодействия в ширину линии спектра ЭПР от концентрации магнитных ядер.
2. В работе впервые исследовано влияние изотопного состава на процессы спин-решеточной релаксации дефектов и примесей в кремнии.

Практическая ценность работы

Результаты, полученные в данной работе, способствуют более глубокому пониманию процессов спиновой релаксации и могут быть полезны при конструировании приборов спинтроники.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Вклад суперсверхтонкого взаимодействия в ширину линии ЭПР пропорционален корню квадратному из концентрации магнитных ядер только в диапазоне больших концентраций магнитных ядер, когда справедливо гауссово распределение резонансных полей. При понижении концентрации магнитных изотопов, зависимость становится линейной.
2. Концентрация магнитных ядер, при которой ещё справедлива корневая зависимость, определяется степенью локализации спиновой плотности парамагнитного центра. Для более делокализованных центров корневой закон остается справедливым при меньших концентрациях, чем в случае локализованных центров.
3. Экспериментально обнаружено значительное сужение линии ЭПР за счет уменьшения вклада ССТВ в ширину линии для ряда парамагнитных центров в кремнии при обогащении изотопом ^{28}Si .
4. Обнаруженное существенное уменьшение времени спин-решеточной релаксации в порошках кремния при изотопном обогащении, связано с уменьшением рассеяния фононов на изотопической примеси
5. В ЭПР ионов хрома влияние изотопного состава кремния совместно с влиянием дефектов структуры проявляется в высокотемпературной части зависимости скорости спин-решеточной релаксации. В низкотемпературной части зависимости обнаружено существенное влияние дефектов и примесей на процессы релаксации, превосходящее изотопические эффекты.

Личный вклад автора

Автором проведены все ЭПР исследования, обработка данных и подготовка образцов к экспериментам, разработана программа для расчета вклада ССТВ в ширину линии ЭПР и осуществлены все численные и аналитические расчеты. Образцы моноизотопного кремния были выращены в ИХВВ РАН и предоставлены профессором Гусевым А.В.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались на шестой и седьмой Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (г. Санкт-Петербург, 2004, 2005 гг.), пятой и десятой молодежных научных школах «Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применений» (г. Казань, 2001, 2006 гг.), девятой, десятой и одиннадцатой сессиях нижегородских молодых ученых (2004, 2005, 2006 гг.), третьей международной конференции «Фундаментальные проблемы физики» (Казань, 2005 г.), десятом симпозиуме «Нанопизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2006 г.), Всероссийской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород – Казань, 2001 г.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликованы 26 научных работ: 6 статей и 20 публикаций в материалах конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Объём диссертации составляет 120 страниц, содержащих 48 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 79 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи данной работы. Показаны её научная новизна, практическая значимость и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященный спиновым и фононным изотопическим эффектам.

Что касается спиновых изотопических эффектов, то в основном исследовались динамические эффекты на донорном центре фосфора в кремнии, в то время как статические эффекты исследовались мало. Вопрос о зависимости ширины линии ЭПР от концентрации магнитных ядер изучался весьма поверхностно, и полученная из общих соображений зависимость, хорошо описывающая данные эксперимента при высоких концентрациях изотопа ^{29}Si , необоснованно экстраполируется в область малых концентраций. Кроме того, при оценке вклада ССТВ в ширину линии ЭПР

при малых концентрациях ^{29}Si пренебрегают влиянием дополнительных механизмов уширения, хотя простой анализ экспериментальных данных говорит о несостоятельности такого подхода.

Фононные изотопические эффекты в твердых телах проявляются в таких свойствах твердых тел, как теплопроводность, теплоемкость, параметр решетки, тепловое расширение, ширина линии фононов в рамановской спектроскопии. Накоплен большой экспериментальный материал по отмеченным эффектам и дано приемлемое теоретическое объяснение большинству наблюдаемых эффектов. Однако в литературе полностью отсутствуют сведения о влиянии изотопических фононных эффектов на ЭПР дефектов и примесей в полупроводниках, на процессы спин-решеточной релаксации.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, а также описанию исследованных образцов. В работе исследовался ЭПР в порошках и поликристаллах кремния, в облученных неоном монокристаллах кремния, а также в монокристаллах кремния легированного хромом. Использовались образцы, обогащенные изотопом 28 и образцы с природным изотопным составом. Одна из серий исследованных образцов имела следующее содержание изотопов ^{28}Si (99.896 ± 0.024)%, ^{29}Si (0.090 ± 0.022)%, ^{30}Si (0.014 ± 0.003)%. Образцы моноизотопного кремния выращивались методами бестигельной зонной плавки без затравки, и с затравкой из моноизотопного кремния. Монокристаллы природного кремния выращивались теми же способами, а также использовались промышленные образцы, выращенные методом Чохральского. Разные серии образцов отличались примесным составом и степенью структурного совершенства.

Третья глава посвящена расчету вклада ССТВ в ширину линии ЭПР в зависимости от концентрации магнитных ядер. Для численного расчета вклада ССТВ в ширину линии была разработана программа, которая позволяла моделировать линию поглощения ЭПР для заданного парамагнитного центра и заданной концентрации лигандных магнитных ядер. Расчеты проводились для глубоких центров вакансии V^- , железа Fe^+ , хрома Cr^+ и мелкого донорного центра фосфора в кремнии, для которых известны константы сверхтонкого взаимодействия, определенные методом двойного электронно-ядерного резонанса [1-4]. Расчетные кривые для вакансии, хрома и железа представлены на рисунке 1. Видно, что в интервале малых концентраций ширина линии возрастает линейно с увеличением концентрации магнитных ядер изотопа ^{29}Si , а в интервале больших концентраций зависимость приобретает корневой характер. Отметим, что в литературе распространено мнение о корневом характере этой зависимости во всем интервале концентраций магнитных ядер [5-6].

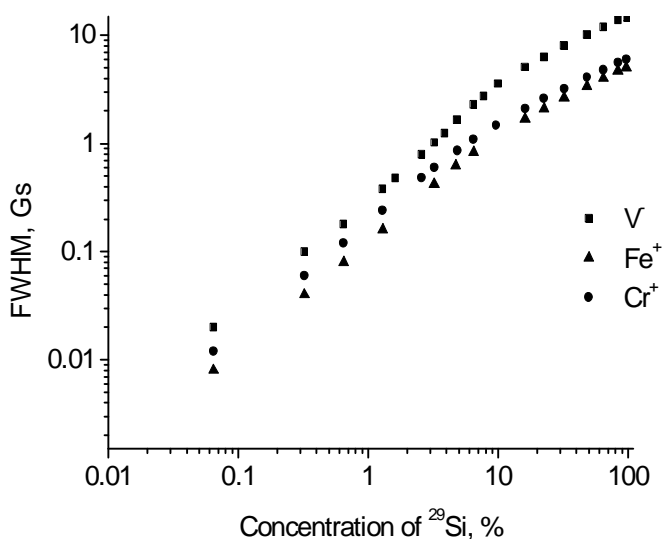


Рис. 1. Зависимость вклада ССТВ в ширину линии спектров ЭПР вакансии V , железа Fe^+ и хрома Cr^+ от концентрации магнитных ядер ^{29}Si . Исходная ширина

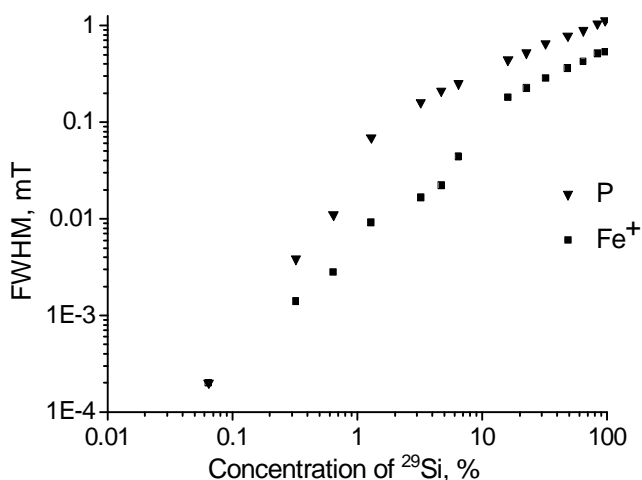


Рис. 2. Зависимость вклада ССТВ в ширину линии спектра ЭПР для донорного центра фосфора и иона железа Fe^+ в кремнии от концентрации магнитных ядер ^{29}Si . В расчетах использованы ССТВ константы из работы [4]

приведена расчетная кривая.

Для сравнения на том же рисунке приведена зависимость для иона железа. Как видно из приведенной зависимости, и в случае мелкого донорного центра наблюдается отклонение от корневой зависимости, однако при

Расчеты, произведенные аналитическим методом моментов, подтвердили результаты численного моделирования. Зависимость фактора формы линии от концентрации магнитных ядер свидетельствует о переходе формы линии поглощения от Гауссовой к Лоренцевой при понижении концентрации, с чем и связан наблюдаемый переход от корневой зависимости к линейной.

В последнее время особый интерес вызывает донорный центр фосфора в кремнии, поскольку во многих моделях твердотельных квантовых компьютерах он рассматривается в качестве квантового бита. В отличие от глубоких центров взаимодействующих со сравнительно малым числом ядер, донорный электрон фосфора сильно делокализован и его спиновая плотность распределена по большому количеству ядер в решетке. Для исследования влияния степени локализации парамагнитного центра на расчетные кривые, была рассчитана зависимость вклада ССТВ в ширину линии ЭПР от концентрации магнитных ядер для фосфора в кремнии. На рисунке 2

меньших концентрациях по сравнению с глубокими центрами, что связано с большей делокализацией спиновой плотности у фосфора. Более быстрый линейный характер этой зависимости приводит к намного меньшему вкладу электронно-ядерных взаимодействий в процессы спиновой релаксации по сравнению с другими механизмами при очистке кремния от магнитных изотопов.

В четвертой главе описываются экспериментальные исследования изотопических эффектов в ЭПР дефектов и примесей в кремнии. Рассматривается влияние суперсверхтонкого взаимодействия с лигандными магнитными ядрами на ширину линии ЭПР, а также влияние изотопического состава на процессы спин-решеточной релаксации.

В ЭПР экспериментах наблюдаются два основных изотопических эффекта. Уменьшение концентрации магнитного изотопа (^{29}Si , $I=1/2$) сужает линию поглощения, за счет уменьшения суперсверхтонкого взаимодействия между электронными и ядерными спинами. Уменьшение изотопического беспорядка, влияет на время спин-решеточной релаксации, что в свою очередь сказывается на температурно-зависимом вкладе в ширину линии поглощения. При достаточно низких температурах релаксационным механизмом уширения можно пренебречь и наблюдаемая ширина линии определяется суперсверхтонким взаимодействием, а также некоторыми остаточными механизмами (dB). Сравнивая ширину линии ЭПР, измеренной при температуре жидкого азота для природного кремния и обогащенного изотопом ^{28}Si , выращенных одинаковыми способами, можно определять изменение ширины линии ΔB_{pp} , вызванное только суперсверхтонким взаимодействием..

В таблице 1 приведены значения вклада ССТВ в ширину линии для исследованных образцов.

Образец	Вклад ССТВ в природном Si ΔB_{sh} , Гс	Остаточная ширина (эксп.), Гс	Расчет вклада ССТВ, Гс
Порошок	2.5	2.8	
Поликристалл	1.7	5.23	
Si:Ne ($D=6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$)	2.7	2	
Si:Cr ⁺	0.55 (ΔB_{pp})	0.86	0.59 (ΔB_{pp})
Si:P ⁰	2.25 ($\Delta B_{1/2}$)	0.08÷0.45	2.1 ($\Delta B_{1/2}$)

Таблица 1. Параметры спектров исследованных образцов. Вклад ССТВ в природном кремнии определялся путём выделения остаточной ширины линии измеренной для моноизотопных образцов методом деконволюции. Приведены также результаты численного расчета ССТВ из главы 3.

Из приведенных данных можно заключить, что парамагнитные центры в порошках и облученных кристаллах кремния имеют схожую природу, поскольку вклады ССТВ в ширину линии ЭПР почти одинаковые. В поликристаллическом кремнии спиновая плотность более локализована, что приводит к меньшему вкладу ССТВ, чем в порошках. Мелкий донорный центр фосфора в кремнии обладает сильно делокализованной спиновой плотностью, что проявляется в большой величине вклада ССТВ. В таблице также приведены значения остаточной ширины линии. Видно, что на величину остаточной ширины сильно влияет дефектность образца. В порошках, поликристаллах и облученных образцах, линия уширяется за счет действия упругих полей. В структурно совершенных образцах, остаточная ширина линии значительно уже, и определяется спин-спиновыми дипольными взаимодействиями с примесями и условиями прохождения. В четвертом столбце приведены расчетные значения вклада ССТВ для природной концентрации изотопов. Наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными.

Информацию о релаксационных процессах в кремнии можно получить из температурных зависимостей спектров ЭПР, а также методом непрерывного насыщения. На рисунке 3 приведены зависимости ширины линии ЭПР от температуры для оборванных связей в порошках кремния с природным и обогащенным изотопным составом.

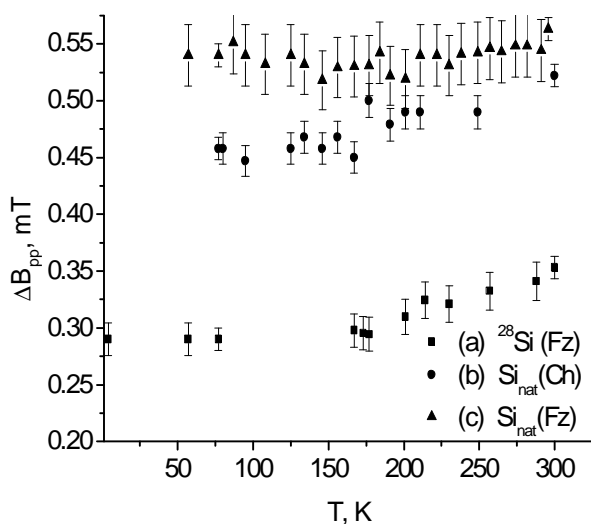


Рис. 3. Температурная зависимость ширины линии ЭПР для порошков (с природным и моноизотопным составом, выращенных методом бестигельной зонной плавки без затравки и с природным составом, выращенного методом Чохральского).

Образец моноизотопного кремния (а) выращен методом зонной плавки без затравки для предотвращения изотопного замещения. Для выделения вклада изотопного состава в спектры ЭПР использовался природный образец (с) выращенный таким же способом. Из рисунка видно, что температурное уширение линии ЭПР больше в моноизотопном образце (кривая (а)), что означает большую скорость спин-решеточной релаксации. Из анализа литературных данных следует, что относительная величина изотопических эффектов, которые могут повлиять на скорость спин-решеточной релаксации, например, таких, как параметр решетки,

фононные частоты и времена жизни, при переходе от природного кремния к моноизотопному, редко превышает несколько процентов. Наблюдаемое нами увеличение скорости СРР в 3 раза мы связываем с уменьшением рассеяния фононов, участвующих в СРР, на изотопической примеси. Сравнивая зависимости для образцов с природным содержанием изотопов, но выращенных различными методами, отличающихся степенью структурного совершенства, можно увидеть влияние дефектов структуры на процессы рассеяния фононов, сопоставимое по величине с изотопическим эффектом. Наблюдается полное подавление процессов спин-решеточной релаксации в образце с природным изотопным составом содержащем большое количество дефектов структуры и изотопической примеси. Было выявлено влияние изотопного состава на релаксационные эффекты и в облученных образцах. Однако, объяснять, как и в случае порошков, разность в температурном уширении спектров только лишь различной эффективностью процессов переносов фононов уже нельзя, поскольку в облученных образцах существуют дополнительные механизмы релаксации связанные с обменными взаимодействиями, а также релаксационные процессы с участием возбужденных состояний.

Бомбардировка ионами, также как и процесс получения порошка, существенно нарушают кристаллическую структуру, вносят множество дефектов, влияние которых на СРР во многом схоже с влиянием изотопической примеси. Поэтому для исследования изотопического эффекта в СРР необходимо использовать такой парамагнитный центр, который можно было бы ввести в кристалл кремния, не нарушая его структуру, и при этом

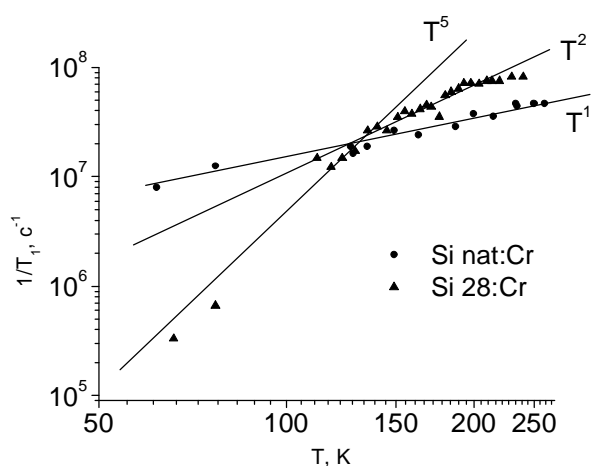


Рис. 4. Зависимость $T_1^{-1}(T)$ для ионов хрома в природном и моноизотопном кремнии. Концентрация ионов хрома в природном образце кремния $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в моноизотопном $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

хорошо изученный, и наблюдаемый в доступном диапазоне температур. К таким центрам относится ион хрома Cr^+ , который можно ввести в кристалл кремния путем диффузии. На рис. 4 приведены зависимости $T_1^{-1}(T)$ для природного и моноизотопного кремния. Наблюдаемое существенное отличие хода зависимостей при низких температурах во многом связано с возникновением параллельного канала релаксации под влиянием дефектов и примесей, среди которых основной вклад может быть связан с кислородом. В пользу этого свидетельствует обнаруженная зависимость скорости спин-решеточной

релаксации от концентрации ионов хрома в моноизотопном образце.

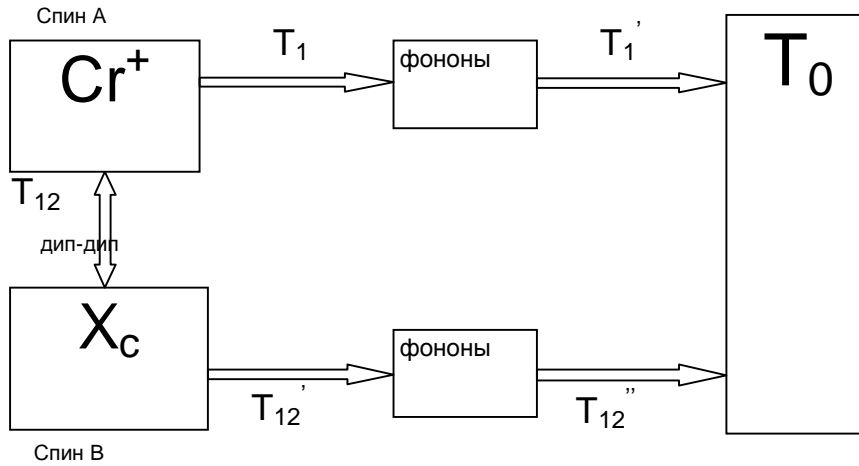


Рис. 5. Блок-схема модели СРР в исследованных образцах кремния.

При высоких температурах расхождение зависимостей обусловлено совместным влиянием изотопической примеси и дефектов структуры на процессы переноса фононов. Была разработана модель спин-решеточной релаксации, объясняющая наблюдаемые зависимости. На рисунке 5 представлена блок схема модели, а также результаты моделирования на рисунках 6 и 7.

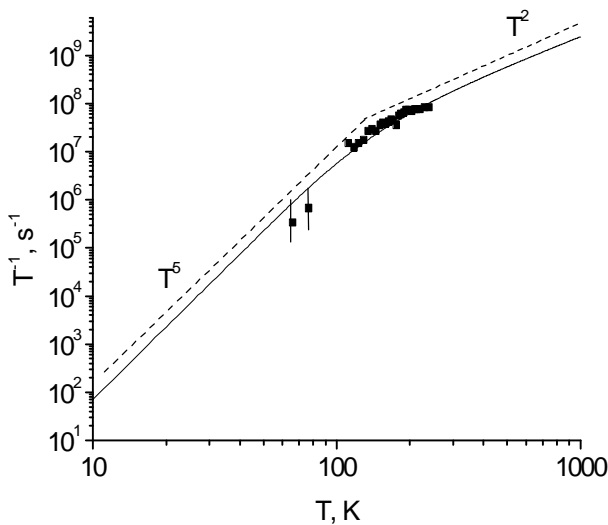


Рис. 6. Зависимость скорости спин-решеточной релаксации от температуры для моноизотопного кремния легированного хромом (квадраты). Сплошной линией представлен результат моделирования процесса спин-решеточной релаксации. Пунктирной линией показаны законы « T^5 » и « T^2 ».

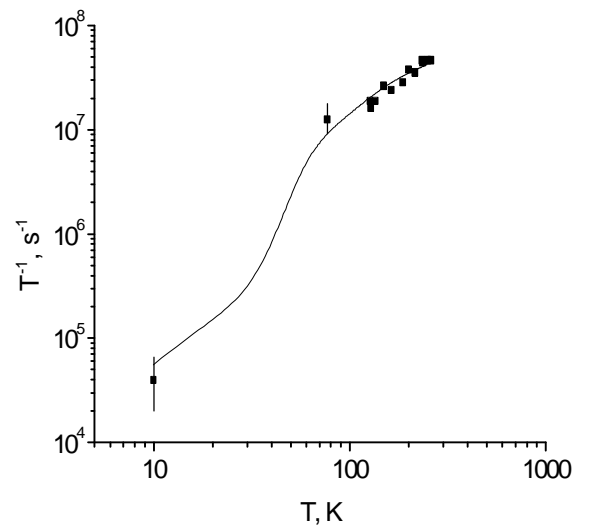


Рис. 7. Зависимость скорости спин-решеточной релаксации от температуры для природного кремния легированного хромом (квадраты). Сплошной линией представлен результат моделирования процесса спин-решеточной релаксации.

В случае моноизотопного образца, вид зависимости как в теории для ионов хрома в совершенных кристаллах, определяется только одним релаксационным процессом Блюма-Орбаха, характеризующимся законом T^5 при низких температурах и T^2 при высоких температурах [7]. В природном образце, для объяснения экспериментальной зависимости необходимо учитывать одновременно несколько механизмов релаксации, в том числе через примесные центры. Для описания высокотемпературной части зависимости, учитывалось рассеяние фононов на изотопах и дефектах структуры.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Численными методами показано, что корневая зависимость вклада ССТВ в ширину линии ЭПР справедлива только при сравнительно больших концентрациях магнитных ядер, когда справедливо гауссово распределение резонансных полей, а при малых концентрациях переходит в линейную зависимость независимо от природы парамагнитного центра. Таким образом, оценки времени потери фазовой когерентности в системе кубитов, основанные на предположении о корневом характере зависимости ССТВ от концентрации магнитных ядер оказываются заниженными.
2. Показано, что значение концентрации, при которой корневой закон остается справедливым зависит от степени локализации спиновой плотности парамагнитного центра. Для более делокализованных центров действие корневого закона распространяется в более широком диапазоне концентраций магнитных ядер.
3. Полученные экспериментальные данные подтверждают существенное влияние изменения изотопного состава кремния на его свойства. Уширение линии ЭПР оборванных связей и ионов хрома в кремнии вызванное суперсверхтонким взаимодействием, уменьшается при переходе к моноизотопному кремнию.
4. Для парамагнитных оборванных связей в кремнии уменьшение времени спин-решеточной релаксации при комнатной температуре свидетельствует о существенном уменьшении рассеяния фононов, ответственных за спиновую релаксацию, обусловленном изменениями в изотопном распределении. Доказано влияние на процессы переноса фононов и структурного совершенства решётки.
5. В ЭПР ионов хрома влияние изотопного состава кремния совместно с влиянием дефектов структуры проявляется в высокотемпературной части зависимости скорости спин-решеточной релаксации, где для объяснения результатов эксперимента необходимо учитывать процессы переноса фононов в условиях сильного рассеяния на изотопах и дефектах.
6. Исследование низкотемпературной части зависимости скорости СРР ионов хрома в кремнии показало существенное влияние дефектов и примесей на процессы релаксации, превосходящее изотопические эффекты. Показана возможность возникновения дополнительных каналов релаксации через

примесные центры. Разработана модель СРР успешно объясняющая полученные экспериментальные зависимости.

Список цитированной литературы

1. Sprenger, M. Magnetic resonance studies on defects in silicon: Ph. D. Thesis / Michiel Sprenger // University of Amsterdam – 1986. – 173 p.
2. Van Kooten, J.J. A magnetic resonance and photoluminescence study on point defects in silicon: Ph. D. Thesis / Jacobus Johannes van Kooten // University of Amsterdam – 1987. – 128 p.
3. Van Kemp, R. Magnetic resonance studies of the oxygen- vacancy complex and interstitial chromium in silicon: Ph. D. Thesis / Ronald van Kemp // University of Amsterdam – 1988. – 144 p.
4. Hale, E.B. Shallow donor electrons in silicon / E.B. Hale, R.L. Miehler // Phys. Rev. – 1969. – Vol.184. – P.739-750.
5. Line Broadening and Decoherence of Electron Spins in Phosphorus-Doped Silicon Due to Environmental ^{29}Si Nuclear Spins / E. Abe, A. Fujimoto, J. Isoya, S. Yamasaki, K.M. Itoh // Phys. Rev. B – 2007 (submitted).
6. Electron spin relaxation times of phosphorus donors in silicon / A. M. Tyryshkin, S. A. Lyon, A. V. Astashkin, A. M. Raitsimring // Phys. Rev. B – 2003. – Vol.68. – P.193207.
7. Blume, M. Spin-Lattice Relaxation of S-State Ions: Mn^{2+} in a Cubic Environment / M. Blume, R. Orbach // Phys. Rev. – 1962. – Vol.127. – P.1587-1595.

Основные публикации по теме диссертации

- A1.** Электронный парамагнитный резонанс моноизотопного высокочистого кремния-28 / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // ДАН – 2001. – т. 376, в 1. – с. 62-65.
- A2.** Магнитный резонанс в моноизотопном кремнии – 28 / А.А. Ежевский, Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Тезисы докладов всероссийского совещания «Высокочистый моноизотопный кремний. Получение, анализ, свойства», Нижний Новгород, 29-30 мая 2001. – С.25-26.
- A3.** Электронный парамагнитный резонанс моноизотопного высокочистого кремния-28 / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Сборник трудов Всероссийской конференции по физике полупроводников, Н. Новгород – Казань, 11-15 сентября, 2001. – С.29.
- A4.** Влияние изотопного состава на ширину линии спектра ЭПР / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, В.А. Гавва, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Сборник трудов Молодежной научной школы «Актуальные проблемы магнитного резонанса и его приложений», Казань, 1-3 ноября, 2001. – С.33-38.

- A5.** Изотопные эффекты в электронном парамагнитном резонансе кремния / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Неорганические материалы – 2002. – Т.32, № 4. – С.403-408.
- A6.** Моноизотопный кремний-28 – изотопические эффекты в ЭПР / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Сборник трудов международного совещания по росту кристаллов, пленок и дефектам структуры кремния “Кремний - 2002”, Новосибирск, 9-12 июля 2002. – С.57.
- A7.** ЭПР в кремнии-28, облученном ионами Ne^+ / Г.Г. Девярых, А.В. Гусев, А.Ф. Хохлов, Г.А. Максимов, А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Е.М. Дианов // Тезисы докладов VI Всероссийского семинара “Физические и физико-химические основы ионной имплантации”, Нижний Новгород, 15-17 октября 2002 – С.87-89.
- A8.** Effects in EPR of defects in silicon caused by changing of silicon isotopes composition / A.A. Ezhevski, D.V. Guseinov, G.A. Maximov, A.F. Khokhlov, A.V. Gusev, G.G. Devyatykh // The 2-nd Nizhny Novgorod Workshop "High-Purity Monoisotopic Silicon. Production, Analysis, Properties and Application", Nizhny Novgorod, June 19-22, 2003. – P.50-51.
- A9.** Гусейнов, Д.В. Изотопические эффекты в ЭПР собственных дефектов и 3d примесей в кремнии / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов IX Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 25-30 апреля 2004. – С. 64.
- A10.** Изотопические эффекты в ЭПР собственных дефектов и примесей в кремнии 28 / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Г.А. Максимов, Г.Г. Девярых, А.В. Гусев // Тезисы докладов Совещания, Иркутск, 5-9 июля 2004. – С.139.
- A11.** Гусейнов, Д.В. ЭПР ионов хрома Cr^+ в моноизотопном кремнии ^{28}Si / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов // Тезисы докладов Шестой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт – Петербург, 7 - 10 декабря 2004. – С.98.
- A12.** Гусейнов, Д.В. Расчет вклада суперсверхтонкого взаимодействия в ширину линии ЭПР в зависимости от концентрации лигандных магнитных ядер ^{29}Si в кремнии-28 / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Вестник Нижегородского университета. Серия «Физика твердого тела» – 2005. – вып. 8. – С.123-129.
- A13.** Гусейнов, Д.В. Релаксационные эффекты в ЭПР ионов хрома в моноизотопном кремнии Si-28 / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов XI Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых, Екатеринбург, 24-30 марта 2005. – С.247-248.
- A14.** Гусейнов, Д.В. Спин – решеточная релаксация в ЭПР ионов хрома в моноизотопном кремнии / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов X Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 18-21 апреля 2005. – С.34-35.
- A15.** Гусейнов, Д.В. Изотопические эффекты в ЭПР ионов хрома в кремнии / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский, А.В. Гусев // Тезисы докладов III

Международной научной конференция "Фундаментальные проблемы физики", Казань, 13-18 июня 2005. – С. 138.

A16. Гусейнов, Д.В. Расчет вклада суперсверхтонкого взаимодействия в ширину линии спектра ЭПР при различных концентрациях изотопа ^{29}Si в кремнии / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов VII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт-Петербург, 5-9 декабря 2005. – С.4.

A17. Guseinov, D.V. The contribution of ^{29}Si ligand superhyperfine interactions to the line width of paramagnetic centers in silicon / D.V. Guseinov, A.A. Ezhevskii, C.A.J. Ammerlaan // Physica B. – 2006. – Vol.381. – P.164-167.

A18. Гусейнов, Д.В. Суперсверхтонкое взаимодействие электронов парамагнитных центров с лигандными ядрами ^{29}Si в кремнии с различным изотопным составом в проблеме спиновой когерентности при квантовых вычислениях / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов XII Всероссийской научной конференции студентов физиков и молодых ученых, Новосибирск, 23-29 марта 2006. – С.397-398.

A19. Гусейнов, Д.В. Спиновая релаксация парамагнитных центров в кремнии при различном содержании ядер ^{29}Si и изменении изотопического беспорядка / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов XI Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 17-21 апреля 2006. – С.20.

A20. Спиновая релаксация электронов, локализованных на мелких и глубоких донорных центрах в кремнии, при различном содержании ядер ^{29}Si и изменении изотопического беспорядка / Д.В. Гусейнов, Д.В. Хомицкий, А.А. Ежевский, А.В. Гусев // Материалы X симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 13-17 марта 2006. – С.429.

A21. Зависимость вклада сверхтонкого взаимодействия электронов глубоких и мелких донорных центров с лигандными ядрами ^{29}Si в ширину линии ЭПР от их содержания в кремнии / А.А. Ежевский, Д.В. Гусейнов, Д.В. Хомицкий, А.В. Гусев // Тезисы докладов 3-го Нижегородского совещания «Высокоочищенный моноизотопный кремний. Получение, анализ, свойства и применение», Нижний Новгород, 13-14 сентября, 2006. – С.24.

A22. Гусейнов, Д.В. Спиновая релаксация парамагнитных центров в моноизотопном кремнии ^{28}Si / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Тезисы докладов I Всероссийской конференции «Физические и физико-химические основы ионной имплантации», Нижний Новгород, 24-27 октября 2006. – С.84.

A23. Гусейнов, Д.В. Спиновая релаксация электронов, локализованных на мелких и глубоких донорных центрах в кремнии с различным изотопным составом / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Сборник трудов X молодежной школы «Актуальные проблемы магнитного резонанса и его применений», Казань, 31 октября-3 ноября 2006. – С.63-66.

A24. Гусейнов, Д.В. Моделирование вклада суперсверхтонкого взаимодействия в ширину линии ЭПР глубоких и мелких примесных центров в кремнии с различным изотопным составом / Д.В. Гусейнов, А.А. Ежевский // Материалы Международной научно-технической конференции

«Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», Москва, 5-9 декабря 2006. – С.232-235.

A25. Guseinov, D.V. EPR line width and spin relaxation rates of shallow and deep donors in isotopically controlled silicon / D.V. Guseinov, A.A. Ezhevskii, C.A.J. Ammerlaan // *Physica B*. 2007.

A26. Спиновая релаксация электронов, локализованных на мелких и глубоких донорных центрах в кремнии, при различном содержании ядер ^{29}Si и изменении изотопического беспорядка / Д.В. Гусейнов, Д.В. Хомицкий, А.А. Ежевский, А.В. Гусев // «Поверхность». 2007 - №6.