

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 538.91:538.915:539.143.5

ПОДРЯБИНКИН
Денис Аркадьевич

**СПИНОВЫЕ СВОЙСТВА СТУПЕНЧАТЫХ НАНОСТРУКТУР КРЕМНИЯ
С ИЗОТОПОМ ^{29}Si**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальностям
05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы,
05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Борисенко Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Борздов Владимир Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета

Пушкарчук Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация

Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 27 сентября 2012 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание новых систем электронной обработки и хранения информации, обусловленные стремительным нарастанием информационных потоков, требуют не только миниатюризации и повышения быстродействия используемых для этих целей интегральных микросхем, но также определяют необходимость освоения качественно новых подходов к обработке информации, базирующихся на квантовых эффектах. Принципиальные преимущества этого подхода заключаются в возможности одновременной параллельной обработки больших массивов информации со скоростями, приближающимися к скорости света.

Прогресс в практическом освоении квантовой обработки информации во многом определяется достижениями нанотехнологий, наноэлектроники и спинтроники. Рассматриваются различные варианты использования для этих целей спин-зависимых электронных, оптоэлектронных и электронно-ядерных эффектов в магнитных и немагнитных полупроводниках, а также в наноструктурах на их основе. Показана принципиальная возможность проведения квантовых вычислений с использованием ионов и молекул в ловушках, находящихся в вакууме, ядерных спинов атомов ^{31}P в кристаллах кремния, спинов электронов в квантовых точках, созданных в двумерном электронном газе в гетероструктурах GaAs, переходов Джозефсона. Возможности использования наноструктур из монокристаллического кремния остаются малоизученными, хотя прорыв в данном направлении позволил бы эффективно соединить перспективные элементы квантовой обработки информации с элементами традиционной кремниевой микроэлектроники. В связи с этим актуальным представляется исследование спиновых свойств кремниевых наноструктур и анализ их пригодности для квантовой обработки информации. При этом основной проблемой, требующей решения, является необходимость защитить каждый квантовый бит информации, называемый кубитом, от воздействия окружающей среды, чтобы предотвратить его неконтролируемое переключение, но при этом сохранить возможность контролируемой «записи» и «чтения» определенного логического состояния.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертационной работы утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 6 от 27.02.2003 г.) и соответствует приоритетному направлению 6.7 «Научные основы создания и

функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике».

Работа выполнялась в Центре нанoeлектроники и новых материалов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках государственных, межвузовских программ и научно-исследовательских работ: грант Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов, № ГР 2002519 «Разработка логических элементов для квантовых вычислений на основе двухуровневой спиновой системы», выполнялся в 2002 г.; грант Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов, № ГР 2003336 «Разработка логических элементов для квантовых вычислений на основе двухуровневой спиновой системы», выполнялся в 2003 г.; грант Министерства образования Республики Беларусь для аспирантов, № ГР 20041778 «Моделирование квантовых логических операций на основе двухуровневых синхронизированных спиновых систем в резонансном поле при непрерывных измерениях», выполнялся в 2004 г.; № ГР 20014058 «Разработать принципы квантовой обработки информации на спиновых системах» междууниверситетская программа фундаментальных исследований «Нанoeлектроника»; № ГР 20066849 «Разработать принципы организации квантовых вычислений и реализующих их элементов и интегрированных систем обработки информации на основе наноструктур» междууниверситетская программа фундаментальных исследований «Электроника».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей проявления спиновых свойств наноструктур, образованных атомами изотопа ^{29}Si и триплетными центрами кислород-вакансия кремния на ступеньках вицинальных поверхностей монокристаллического кремния, для создания на их основе интегральных элементов для квантовой обработки информации.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

– проанализировать известные данные по спиновым свойствам наноструктур и определить возможности создания интегральных элементов для квантовой обработки информации на их основе;

– разработать модельный элемент для квантовой обработки информации на кремниевой ступенчатой наноструктуре и выбрать методику моделирования его спиновых свойств;

– разработать физико-математические модели и численно оценить электронно-ядерное взаимодействие и закономерности поляризации и декогеренции спиновых состояний в кремниевой ступенчатой наноструктуре, содержащей магнитные изотопы кремния;

– выявить возможности и закономерности неразрушающих измерений спиновых состояний в кремниевой ступенчатой наноструктуре, содержащей магнитные изотопы кремния;

– оценить перспективы применения исследованных наноструктур для квантовой обработки информации.

Объектом исследования является кремниевая ступенчатая наноструктура, содержащая цепочки магнитного изотопа ^{29}Si на внешних краях вицинальных граней. Предметом исследования служат спиновые свойства таких кремниевых наноструктур и закономерности их изменения при воздействии внешнего магнитного поля, инжектированных в них электронов и электромагнитного излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. Сверхтонкое взаимодействие спинов ядер изотопа ^{29}Si и триплетных центров, образованных комплексами кислород-вакансия кремния и расположенных на внешних краях вицинальных граней кремниевой ступенчатой наноструктуры, приводит к самоподдерживающейся динамической поляризации этих ядер, охватывающей в максимуме до 80 % атомов ^{29}Si в цепочке, при отношении времени жизни возбужденного триплетного состояния ко времени его спиновой релаксации $0,95 - 1,0$, темпе заселения триплетного центра электронами $10^6 - 10^7 \text{ с}^{-1}$, напряженности внешнего магнитного поля $(14,3 - 55,7) \times 10^3 \text{ А/м}$ ($180 - 700 \text{ Э}$), что позволяет создавать элементы квантовой обработки информации на основе таких структур.

2. Скорость декогеренции квантовых состояний ансамблевого кубита, образованного цепочкой из магнитных изотопов ^{29}Si на ступеньке вицинальной поверхности монокристаллического кремния, уменьшается с 1325 до $1,25 \text{ мс}^{-1}$ с увеличением расстояния между триплетным центром, образованным комплексом кислород-вакансия кремния, и кубитом от 0,1 до 10 нм, при этом с ростом количества магнитных изотопов в кубите от 10 до 300 скорость декогеренции возрастает в 1,5–3 раза, а при количестве изотопов более 300 скорость декогеренции не изменяется.

3. Время измерения квантового состояния электронно-ядерной спиновой системы, состоящей из цепочки магнитного изотопа кремния и триплетного центра, образованного комплексом кислород-вакансия кремния, в течение которого не нарушается когерентность в условиях проведения непрерывных

измерений и синхронизации фаз, определяется главным образом амплитудой внешнего магнитного поля, величиной сверхтонкого взаимодействия, точностью и дисперсией непрерывных квантовых измерений и составляет $(3 - 5) \times 10^{-7}$ с при индукции внешнего магнитного поля 1,7 – 1,9 Тл.

4. Наноструктура, образованная цепочками магнитного изотопа кремния ^{29}Si на вицинальной поверхности кремния со ступеньками шириной 2 – 3 нм и высотой 1 нм, включающая в себя триплетные центры, образованные комплексами кислород-вакансия кремния вблизи каждой цепочки, может быть использована в качестве квантового элемента обработки информации при разделении резонансных частот атомов ^{29}Si в соседних цепочках внешним магнитным полем с градиентом 0,3 – 0,4 Тл/мкм, ограничении числа атомов магнитного изотопа в цепочке от 10 до 200, измерениях, не разрушающих квантовые состояния ядерных спинов.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в подготовке и проведении теоретических расчетов спиновых свойств кремниевых наноструктур, разработке методики моделирования спиновых систем при непрерывных квантовых измерениях, моделировании свойств ступенчатой наноструктуры, содержащей цепочки магнитного изотопа кремния, в рамках выбранного метода, в обработке и анализе полученных результатов, в выработке практических рекомендаций. Вклад научного руководителя, доктора физико-математических наук, профессора В. Е. Борисенко состоит в постановке цели и задач исследования, обсуждении и интерпретации результатов. Кандидатом физико-математических наук А. Л. Данилюком даны рекомендации по выбору основных элементов методики моделирования спиновых систем, а также критическая оценка и интерпретация полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на X Республиканской конференции «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Республика Беларусь, 2002 г.); III и IV Белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск – Нарочь, Республика Беларусь, 2005 г., 2006 г.); XII, XIII, XIV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи» (Минск, Республика Беларусь, 2007 г., 2008 г., 2009 г.); Международной НТК «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей» (Минск, Республика Беларусь, 2006 г.); Международных конференциях по физике, химии

и применению наноструктур «Nanomeeting–2005» и «Nanomeeting–2007» (Минск, Республика Беларусь, 2005 г., 2007 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ: 10 статей в рецензируемых научных журналах, 4 статьи в сборниках научных конференций, 5 тезисов докладов на научных конференциях.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,9 авторских листа. Опубликованных материалов – 45 страниц, из них 43 страницы в совместно опубликованных научных работах и 2 страницы в 1 работе без соавторов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложения. В **первой главе** проанализированы существующие разработки твердотельных элементов на основе спиновых систем для квантовой обработки информации, принципы их функционирования, особенности их конструкции и определены проблемы, возникающие при теоретическом описании таких структур. Во **второй главе** описан разработанный модельный элемент на основе кремниевой ступенчатой наноструктуры и представлена методика моделирования ее спиновых свойств с учетом непрерывных квантовых измерений. В **третьей главе** представлены результаты моделирования инжекционной поляризации ядерных спинов и их декогеренции в кремниевой ступенчатой наноструктуре, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si , при сверхтонком взаимодействии ядер этого изотопа с возбужденными триплетными центрами, образованными комплексами кислород-вакансия. В **четвертой главе** приведена компоновка наноструктуры для квантовой обработки информации, определены критерии ее функционирования, предложены способы измерения спиновых состояний в ней.

Общий объем диссертации составляет 122 страницы, из них 94 страницы основного текста, 43 иллюстрации на 20 страницах, 3 таблицы на 1 странице, библиографический список из 80 наименований на 6 страницах, приложение на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования. Сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы, проанализированы существующие разработки твердотельных элементов на основе спиновых систем для квантовой обработки информации, принципы их функционирования, особенности их конструкции и определены проблемы, возникающие при теоретическом описании таких структур. Перечислены основные нерешенные задачи для квантовой обработки информации на спиновых системах. Обоснован выбор кремния и наноструктур на его основе в качестве объекта исследования. Описаны квантовые алгоритмы и логические операции. В выводах сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе описан разработанный модельный элемент на основе кремниевой ступенчатой наноструктуры и представлена методика моделирования ее спиновых свойств с учетом непрерывных квантовых измерений [3–А, 7–А, 9–А].

В качестве исходной выбрана ступенчатая наноструктура на вицинальной поверхности монокристаллического кремния, показанная на рисунке 1. Предложенный модельный элемент включает: для квантовой обработки информации – цепочки магнитных изотопов кремния ^{29}Si ; для поляризации в базовое состояние – затворы и триплетные центры, образованные комплексами кислород-вакансия; для измерения спиновых состояний – одноэлектронные транзисторы. Особенности функционирования и компоновки предложенной наноструктуры заключаются в следующем:

1. Цепочка образует ансамблевый кубит и расположена перпендикулярно внешнему магнитному полю.

2. Вблизи каждой цепочки расположены затворы (квантовые шнуры) и триплетный центр (комплекс вакансия-кислород) для поляризации спиновых состояний ансамблевого кубита. Триплетный центр возбуждается в неравновесное спиновое состояние путем инжекции электронов из примыкающих к нему электродов.

3. Разделение резонансных частот ансамблевых кубит осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, создаваемого магнитной пленкой.

4. Измерения спиновых состояний электрона на триплетном центре, связанном через сверхтонкое взаимодействие с ядерными спинами ансамблевого кубита, осуществляются с помощью одноэлектронного транзистора, содержащего триплетный центр в качестве элемента своей конструкции.

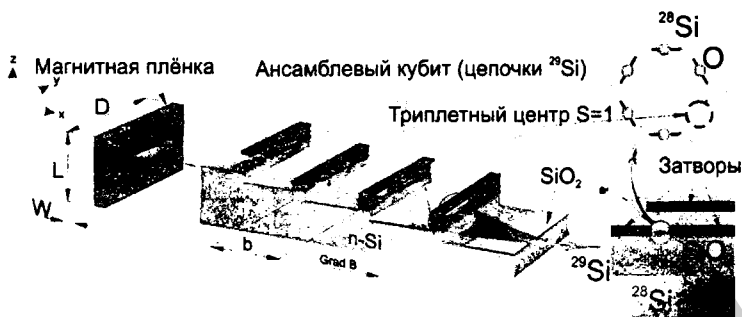


Рисунок 1 – Модельный элемент наноструктуры

На основе нестационарного уравнения Шрёдингера разработаны системы уравнений, описывающие изменения ориентации электронного, ядерного и системы электронно-ядерного спинов в переменном магнитном поле при непрерывных квантовых измерениях их спиновых проекций на выделенное направление. Учет непрерывных измерений осуществлен с помощью уравнения Шрёдингера с комплексным гамильтонианом [1–А]:

$$\left| \frac{d\psi}{dt} \right\rangle = \left[-\frac{i}{\hbar} H - k(I - n(t))^2 \right] \psi,$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние измерительной системы на квантовую, который определяется точностью измерений;

H – гамильтониан измеряемой системы;

$n(t)$ – значение наблюдаемой величины I в момент времени t , найденное в процессе непрерывного измерения.

Функция I соответствует нормированным на постоянную Планка значениям проекций спина на оси координат.

Для функций результатов измерений получено уравнение

$$\frac{d}{dt} n(t) = \frac{[I - n(t)]^2 \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2} \cdot [(\ln(a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2) + 1 - \lambda_0) - \frac{1}{2} \lambda_1]}{\lambda_1 \int_0^t [I - n(t)] dt},$$

где λ_0, λ_1 – константы, характеризующие точность измерений, их дисперсию, а также нормировку волновой функции;

a_i, b_i – амплитуды комплексных коэффициентов, характеризующих собственные функции оператора спина.

Полученные системы уравнений самосогласованно включают результаты непрерывных квантовых измерений в соответствии с критерием движения спиновой системы к одному из двух возможных состояний. Такие непрерывные

измерения состоят из серии повторных мгновенных неразрушающих измерений спиновых состояний.

Показано, что динамика поведения электронного спина, находящегося в магнитном поле, определяется точностью и дисперсией непрерывных квантовых измерений, а динамика взаимодействующего с ним ядерного спина – величиной константы связи и величиной внешнего магнитного поля [1–А, 2–А].

Разработана модель синхронизации связанных двухуровневых спиновых систем в магнитном поле на основе метода стохастического резонанса, учитывающего влияние хаотических колебаний (шума) [4–А]. В качестве критерия эффективной синхронизации использовано соотношение

$$\Delta S = 2\pi \frac{\Omega(t)}{m} - D \geq 0,$$

где Ω – частота колебаний электронно-ядерной системы;

m – характерное количество колебаний системы, в течение которых происходит захват разности фаз;

$D = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} [\langle \phi^2(t) \rangle - \langle \phi(t) \rangle^2]$ – коэффициент эффективной диффузии разности фаз $\phi(t)$ колебаний ядерной и электронной спиновых систем.

Предложенные модели позволяют провести расчеты спиновых свойств электронно-ядерной системы с учетом непрерывных квантовых измерений в режиме синхронизации фаз.

В третьей главе представлены результаты моделирования инжекционной поляризации ядерных спинов и их декогеренции в кремниевой ступенчатой наноструктуре, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si , при сверхтонком взаимодействии ядер этого изотопа с возбужденными триплетными центрами, образованными комплексами кислород-вакансия [6–А]. Рассмотрено влияние внешнего магнитного поля, параметров, характеризующих тонкую структуру триплетного центра (H_D и H_E), поля ядер h_N на электроны и темпа инжекции на величину ядерной спиновой поляризации P_n [10–А].

Полученные немонотонные закономерности характеризуются наличием областей со сравнительно слабыми изменениями величины поляризации, которые разделены резкими скачками (фазовые переходы) ядерной поляризации (рисунки 2, 3).

Установлена возможность возникновения самоподдерживающейся поляризации спинов ядер, инициированной внешним магнитным полем [19–А].

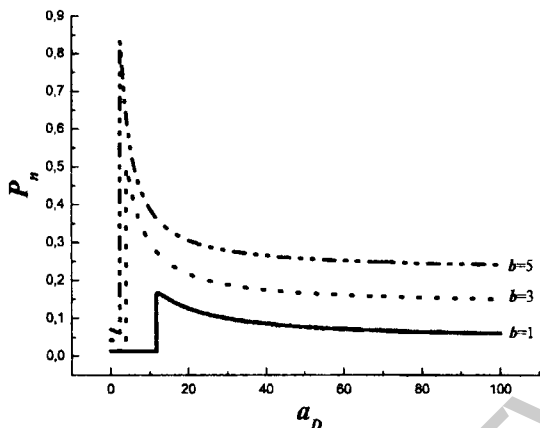


Рисунок 2 – Степень спиновой инжекционной поляризации ядер ^{29}Si в зависимости от параметра, характеризующего тонкую структуру триплетного центра с учетом поля ядер a_D и параметра b , зависящего от темпа инжекции

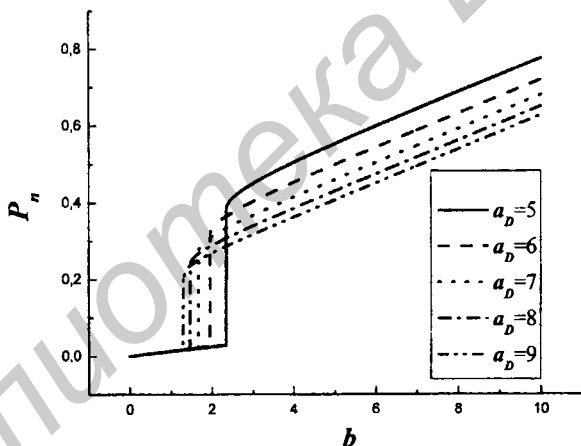


Рисунок 3 – Степень спиновой инжекционной поляризации ядер ^{29}Si в зависимости от параметра b , зависящего от темпа инжекции, и параметра, характеризующего тонкую структуру триплетного центра с учетом поля ядер a_D

Обнаружено, что максимальные значения спиновой поляризации, охватывающей до 80 % атомов в цепочке, возникают при отношении времени жизни возбужденного триплетного состояния ко времени его спиновой релаксации 0,95 – 1,0, темпе заселения состояний триплетного центра (инжекции) электронами $10^6 - 10^7 \text{ c}^{-1}$, напряженности внешнего магнитного поля $(14,3 - 55,7) \times 10^3 \text{ A/m}$ (180 – 700 Э) [10–А].

Проведено моделирование скорости декогеренции кубита из цепочки магнитных изотопов кремния с учетом степени начальной когерентности спинов ядер в кубите, времени поперечной релаксации ядерной поляризации, обусловленной спин-спиновым ядерным (диполь-дипольным) взаимодействием как пределом времени декогеренции [14–А – 18–А]. В расчетах скорости декогеренции квантовых состояний кубита учитывали только сдвиг фаз при диполь-дипольном взаимодействии [8–А]. При этом пренебрегали обменом энергией между спинами, который описывается flip-flop переходами. Скорость декогеренции при этом соответствует обратному времени затухания измеряемого сигнала в e раз в зависимости от степени когерентности, величина которой определяет уровень измеряемого сигнала. Расчеты скорости декогеренции проводили для кубита с количеством атомов в цепочке n от 10 до 800 [9–А]. Рассчитанная величина времени поперечной релаксации ядерной поляризации для предложенной и оптимизированной конфигурации цепочки составляет 1,1 мс.

Зависимость скорости декогеренции от степени начальной когерентности кубита характеризуется наличием области ее резкого увеличения с ростом степени когерентности, переходящей в область насыщения (рисунки 4, 5). При степени когерентности, близкой к нулю, скорость декогеренции существенно уменьшается [9–А]. В отсутствие локализованных электронов скорость декогеренции в области насыщения слабо падает с ростом числа атомов. При этом скорость декогеренции растет с ростом числа атомов в кубите и с уменьшением расстояния от триплетного центра до кубита.

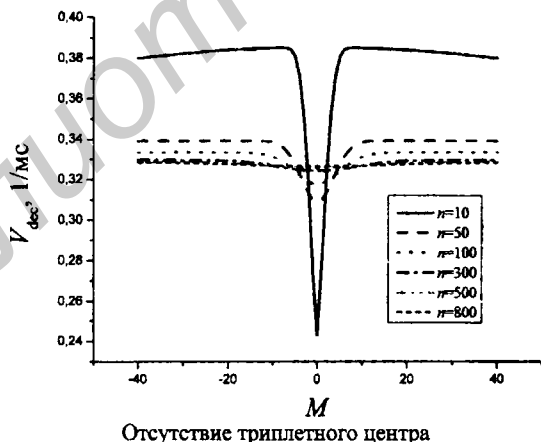
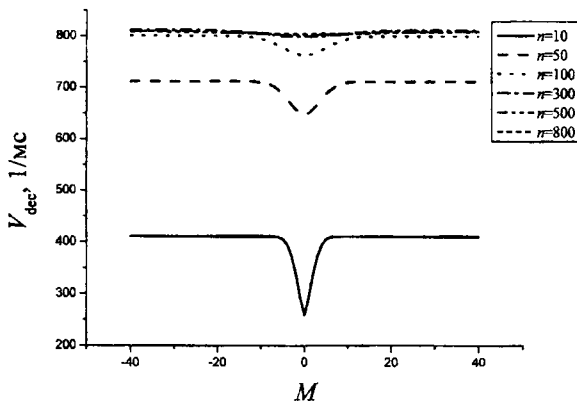


Рисунок 4 – Скорость декогеренции кубита в зависимости от степени его начальной когерентности и числа атомов магнитного изотопа в цепочке n



Наличие триплетного центра при различном расстоянии r_{IS} от центра до цепочки 5 нм
Рисунок 5 – Скорость декогеренции кубита в зависимости от степени его начальной когерентности и числа атомов магнитного изотопа в цепочке n

Установлено, что величина скорости декогеренции квантовых состояний ансамблевого кубита уменьшается с 1325 до $1,25 \text{ ms}^{-1}$ с увеличением расстояния между триплетным центром и кубитом от 0,1 до 10 нм. С ростом количества атомов магнитного изотопа в кубите от 10 до 300 скорость декогеренции возрастает в 1,5–3 раза, а при количестве изотопов более 300 скорость декогеренции меняется незначительно.

В выводах по главе обобщены полученные результаты моделирования инжекционной поляризации ядерных спинов и их декогеренции в ступенчатой наноструктуре, а также отмечена возможность возникновения самоподдерживающейся поляризации спинов ядер.

В четвертой главе приведена компоновка наноструктуры для квантовой обработки информации, определены критерии ее функционирования, предложены способы измерения спиновых состояний в ней.

В результате проведенных расчетов динамики изменения электронного (ядерного) спина в переменном магнитном поле при непрерывных квантовых измерениях спиновых состояний показано, что воздействие внешнего переменного магнитного поля на двухуровневую спиновую систему при наличии непрерывных квантовых измерений ведет к росту времени сохранения когерентности квантовых состояний, при этом матрица плотности квантовой системы является функцией времени вида t^{-s} , где коэффициент s лежит в пределах 0,4–2,0. Его величина, помимо параметров квантовой системы, определяется также точностью и дисперсией непрерывных квантовых измерений.

Проведены расчеты синхронизации связанных двухуровневых спиновых систем в магнитном поле на основе метода стохастического резонанса для определения периода времени, в течение которого выполняется критерий

эффективной синхронизации [4–А]. Установлены закономерности влияния константы сверхтонкого взаимодействия и точности измерений спиновых состояний на величину критерия эффективной синхронизации. Показано, что в области $0,01 - 0,1$ значений коэффициента k , характеризующего влияние измерительной системы на точность квантовых измерений, выполняется критерий эффективной синхронизации в течение $8 - 45$ периодов Раби при значении константы сверхтонкого взаимодействия в области $7,5 - 300$ ГГц, что соответствует $(1 - 5,5) \times 10^{-7}$ с.

В результате проведенных расчетов влияния непрерывных квантовых измерений на динамику электронно-ядерной спиновой системы (цепочка магнитного изотопа кремния и электрон на триплетном центре) установлено, что время измерения квантового состояния такой системы, в течение которого не нарушается когерентность в условиях проведения непрерывных измерений и синхронизации фаз, определяется главным образом амплитудой внешнего магнитного поля, величиной сверхтонкого взаимодействия, точностью и дисперсией непрерывных квантовых измерений и составляет $(3 - 5) \times 10^{-7}$ с при значении индукции внешнего магнитного поля $1,7 - 1,9$ Тл.

Предложена компоновка квантовой вычислительной структуры, использующая ансамблевый вариант организации вычислений [11–А – 13–А]. С целью уменьшения величины градиента магнитного поля предложено разместить ансамблевые кубиты в виде цепочек ядерных спинов на ступеньках вицинальной поверхности кремния (ширина ступенек $2 - 3$ нм, а высота 1 нм). Такую структуру предложено формировать на вицинальной поверхности монокристаллического кремния (^{28}Si), не содержащего магнитных изотопов. В качестве кубит используются ядра ^{29}Si со спином $1/2$, которые дополнительно располагают в относительно изолированных атомных цепочках на этой поверхности. Вблизи цепочек формируют триплетные центры кислород-вакансия для поляризации магнитных изотопов и считывания результатов.

Формирование вицинальной поверхности предложено осуществлять по технологии последовательного отжига, а одноатомные цепочки изотопа ^{29}Si вдоль ступенек вицинальной грани – методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Проверка прямолинейности граней цепочки осуществляется при помощи атомного силового микроскопа. Триплетные центры Si-O формируются на границе кремний/оксид кремния (Si/SiO_2). В области каждого центра осаждаются управляющие затворы.

Поляризация ядерных спинов в цепочках осуществляется посредством триплетных центров, находящихся в неравновесном спиновом состоянии. Такое состояние достигается путем инжекции электронов. При возбуждении триплетных центров в магнитном поле происходит их переход в неравновесное поляризованное спиновое состояние $S = 1$, что способствует эффективной

поляризации ядер магнитного изотопа кремния без использования циркулярно-поляризованного света.

Для измерения поляризации ядерных спинов предложено использовать несколько вариантов. Все они связаны с измерением степени поляризации электрона на триплетном центре, которая зависит от поляризации ядерных спинов вблизи центра (через сверхтонкое взаимодействие). Измерить поляризацию спина электрона можно несколькими способами:

1. Оптическим возбуждением электрона на триплетном центре с последующим анализом поляризации его излучательной рекомбинации, которая определяется спиновой поляризацией электрона. Одним из вариантов является измерение фототока, пропорционального поляризации спинового состояния.

2. Формированием одноэлектронного транзистора, содержащего триплетный центр в качестве элемента его конструкции. Ток одноэлектронного транзистора крайне чувствителен к перераспределению заряда на центре, величина которого в свою очередь зависит от спиновой поляризации электрона.

Разделение резонансных частот кубит производится с помощью градиента магнитного поля, создаваемого ферромагнитной пленкой, расположенной на боковой поверхности подложки (см. рисунок 1). Проведенными расчетами необходимого распределения магнитного поля на вицинальной поверхности данной наноструктуры показано, что в предложенной конструкции имеется практически постоянный градиент магнитного поля в области от 2,5 до 5 мкм, величина которого составляет 0,34 Тл/мкм.

Величина критерия эффективного времени сохранения поляризации ядерных спинов ансамблевого кубита (α) должна быть порядка единицы. В данной структуре величина α составляет 0,5–0,6 при расстоянии между цепочками ядерных спинов (ансамблевыми кубитами) $b = 2 - 3$ нм [7–А].

Одним из важнейших моментов оценки работоспособности структуры является удовлетворение критерию разделения резонансных частот ансамблевых кубит η [5–А]. Величина критерия η рассчитывается исходя из условия, что разность резонансных частот близлежащих кубитов должна быть много больше константы диполь-дипольного взаимодействия между ядрами в соседних кубитах. Проведенные расчеты показали, что для рассматриваемых условий выполняется эффективное разделение резонансных частот. При расстоянии между цепочками ядерных спинов (ансамблевыми кубитами) $b = 2 - 3$ нм величина $\eta = 150 - 170$.

Критерий возмущения резонансной частоты кубита соседним кубитом (β), величина которого должна быть меньше единицы, связан с влиянием соседних кубит на значение резонансной частоты данного кубита. Для рассматриваемой наноструктуры величина $\beta \ll 1$ и равна $9,372 \times 10^{-5}$.

В качестве логического элемента «НЕ» для квантовых вычислений предложено использовать электронно-ядерную спиновую систему. Для

логической операции «Контролируемое НЕ» предложено использовать систему из двух соседних кубит. При изменении состояния первого кубита второй меняет свое состояние за счёт диполь-дипольного взаимодействия. Логических элементов «НЕ» и «контролируемое НЕ» достаточно для построения системы квантовой обработки информации и вычислений.

Рассмотренный эффект поляризации ядер в поле триплетного центра может быть использован для создания памяти на ядерных спинах, управляемой током инжектированных электронов. При захвате инжектированного электрона на триплетный центр происходит поляризация близлежащих ядерных спинов атомов из ансамблевого кубита. Такие поляризованные состояния ядер могут быть использованы в качестве элемента для хранения бита памяти.

В выводах по главе обобщены результаты определения условий функционирования предложенной наноструктуры в качестве элемента квантовой обработки информации, а также даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны модели и получены уравнения, описывающие динамику поведения электронно-ядерной спиновой системы, образованной цепочкой ядер магнитного изотопа кремния и триплетным центром, включающим комплекс кислород-вакансия, для условий, когда система находится в переменном магнитном поле и подвергается непрерывным квантовым измерениям. Полученные уравнения отличаются самосогласованным учётом влияния результатов непрерывных квантовых измерений на динамику спиновой системы в соответствии с критерием движения системы к одному из двух возможных состояний, а также включением в них механизма синхронизации фаз ядерного и электронного спина. Предсказан рост времени сохранения когерентности спиновых состояний при непрерывных измерениях с низкой точностью и минимальной дисперсией. Определена зависимость времени неразрушающего измерения спиновых свойств данных систем от амплитуды внешнего магнитного поля, расстояния от электрона до ядра атома и уровня взаимодействия между квантовой и измерительной системами. Показано, что время измерения квантового состояния данной системы, в течение которого не нарушается когерентность в условиях проведения непрерывных измерений и синхронизации фаз, составляет $(3-5) \times 10^{-7}$ с при индукции внешнего магнитного поля 1,7 – 1,9 Тл [1–А – 4–А, 12–А].

2. Разработана модель и получены уравнения, описывающие степень инжекционной поляризации системы ядерных спинов в кремниевой

наноступенчатой структуре, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si , за счет их сверхтонкого взаимодействия с триплетными центрами, образованными комплексами кислород-вакансия кремния и находящимися в неравновесном спиновом состоянии. Отличие полученной модели в том, что в нее включен инжекционный механизм спинового возбуждения триплетного центра и произведен самосогласованный учет влияния поля ядер на триплетном центре на конечную поляризацию ядер ^{29}Si . Установлено влияние на величину ядерной поляризации внешнего магнитного поля H_Z , параметров, характеризующих тонкую структуру триплетного центра H_D , поля ядер h_N и темпа инжекции электронов и обнаружены скачки величины ядерной поляризации (фазовые переходы) при варьировании этих параметров. Обнаружена возможность возникновения самоподдерживающейся поляризации спинов ядер, инициированной внешним магнитным полем. Показано, что при скачке максимальная величина ядерной поляризации может достигать 80 % от количества атомов ^{29}Si в цепочке при отношении времени жизни возбужденного триплетного состояния ко времени его спиновой релаксации 0,95 – 1,0, темпе заселения состояний триплетного центра электронами $10^6 - 10^7 \text{ с}^{-1}$, напряженности внешнего магнитного поля $(14,3 - 55,7) \times 10^3 \text{ А/м}$ (180 – 700 Э) [6–А, 10–А, 19–А].

3. Разработана модель, описывающая процесс декогеренции квантовых состояний в ансамблевом кубите в зависимости от количества атомов ^{29}Si в цепочке, расстояния от цепочки до триплетного центра, степени начальной когерентности ядерных спинов. Установлено, что с уменьшением расстояния от триплетного центра до кубита r_{IS} скорость декогеренции растёт ($V_{\text{dec}} = 0,31 \text{ мс}^{-1}$; $1,25 \text{ мс}^{-1}$; 650 мс^{-1} ; 1325 мс^{-1} , при отсутствии центра, $r_{IS} = 10 \text{ нм}$, 5 нм , $0,1 \text{ нм}$ соответственно). С ростом количества атомов в кубите n от 10 до 300 скорость декогеренции также возрастает ($V_{\text{dec}} = 250 \text{ мс}^{-1}$; 650 мс^{-1} ; 760 мс^{-1} при $n = 10, 50, 100$ соответственно), а при количестве атомов 300 и более меняется незначительно ($n = 300 - 800$, $V_{\text{dec}} \approx 800 \text{ мс}^{-1}$). Для получения необходимого значения времени выполнения квантовых операций или времени измерения состояний кубит необходимо ограничивать количество атомов в кубите [8–А, 9–А, 15–А – 18–А].

4. Рассчитаны критерии эффективной работы кремниевой вычислительной наноструктуры, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si при сверхтонком взаимодействии его ядер с возбужденными триплетными центрами, образованными комплексами кислород-вакансия кремния и расположенными на внешних краях вицинальных граней кремниевой ступенчатой наноструктуры. Проведенными расчетами показано, что характерное время поперечной релаксации T_2 в цепочках из изотопа кремния, разделенных с помощью градиента магнитного поля, составляет $1,1 \times 10^{-3} \text{ с}$, а время декогеренции

порядка 5×10^{-4} с, что достаточно для того, чтобы не учитывать эффект возмущения резонансной частоты отдельного ядра соседним ядром в рассматриваемых цепочках ядерных спинов магнитного изотопа кремния. В этом случае разделение резонансных частот ансамблевых кубит эффективно в области 2,5–3,5 мкм при расстоянии между кубитами 2–3 нм. Оценка критериев разделения резонансных частот и сохранения поляризации ядерных спинов ансамблевого кубита показала, что в данной структуре величина α составляет 0,5–0,6, а критерия $\eta = 170$ при расстоянии между цепочками ядерных спинов (ансамблевыми кубитами) $b = 2–3$ нм. Рассмотренный эффект поляризации ядер в поле триплетного центра может быть использован для создания памяти на ядерных спинах, управляемой током инжектированных электронов. На основе полученных данных о критериях, распределении магнитного поля, эффекте поляризации ядер в поле триплетного центра предложена наноструктура для реализации логических элементов «НЕ» и «Контролируемое НЕ» [3–А, 5–А, 7–А, 11–А – 13–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Кремниевые ступенчатые наноструктуры, содержащие цепочки магнитных изотопов кремния, могут быть использованы для создания интегральных микросхем, содержащих квантовые каналы обработки и передачи информации (например, для систем квантовой криптографии), элементов квантовой памяти, логических элементов устройств, реализующих квантовые вычисления, а также при организации процессов квантовой телепортации и криптографии с небольшим числом кубит. Для производства предложенных и исследованных кремниевых наноструктур не требуется дорогостоящее оборудование, технология их формирования базируется на стандартной кремниевой технологии и потребует только соответствующей модификации.

Научные результаты выполненных исследований используются при подготовке инженеров на кафедре Микро- и нанoeлектроники БГУИР по специальности «Квантовые информационные системы» (электронный учебно-методический комплекс «Квантовые вычисления») в курсе лекций по дисциплине «Квантовые вычисления».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Данилюк, А.Л. Эволюция двухуровневой системы в резонансном периодическом поле (в условиях измерений) / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – № 1(11)/3. – С. 66–68.

2–А. Данилюк, А.Л. Модели логических спиновых элементов для квантовых вычислений / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – № 1(11)/3. – С. 69–71.

3–А. Подрябинкин, Д.А. Модель и логические элементы для квантовых вычислений на спиновых системах в резонансных полях / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк, В.Е. Борисенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2002. – Т. 7. – № 3. – С. 67–72.

4–А. Данилюк, А.Л. Синхронизация колебаний связанных двухуровневых спиновых систем в резонансном поле для квантовых вычислений / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 2(14)/2. – С. 75–77.

5–А. Данилюк, А.Л. Частотное разделение ансамблевых кубит в кремниевом квантовом вычислительном кластере / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2(18)/2. – С. 61–62.

6–А. Данилюк, А.Л. Релаксация ядерной поляризации ансамблевых кубит в кремниевом квантовом вычислительном кластере / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 1(19)/5. – С. 115–116.

7–А. Подрябинкин, Д.А. Квантовая вычислительная структура на основе кремния / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/3. – С. 301–304.

8–А. Подрябинкин, Д.А. Декогеренция квантовых состояний ансамблевых кубит в кремниевом вычислительном кластере / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк, В.Е. Борисенко // Прикладная Физика. – 2008. – № 4. – С. 20–26.

9–А. Подрябинкин, Д.А. Квантовый вычислительный модуль на основе кремниевой ступенчатой наноструктуры / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк, В.Е. Борисенко // Доклады БГУИР. – 2009. – № 3 (41). – С. 67–72.

10–А. Подрябинкин, Д.А. Инжекционная поляризация спинов ядер ^{29}Si в кремниевых наноструктурах / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк, В.Е. Борисенко // Прикладная физика. – 2011. – № 2. – С. 12–18.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

11–А. Подрябинкин, Д.А. Логические элементы для квантовых вычислений / Д.А. Подрябинкин // Физика конденсированного состояния: материалы X республик. конф., Гродно, Беларусь, 24–26 апр., 2002 г. / Гродненский гос. ун-т, Гродно, 2002. – С. 261–262.

12–А. Podryabinkin, D.A. Quantum computing cluster on the basis of ^{29}Si chains / D.A. Podryabinkin, A.L. Danilyuk // Physics, Chemistry and Application of

Nanostructures / Ed. by V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin / Minsk, Belarus, 24–27 may 2005 / Word Scientific Publishing, Singapore, 2005. – P. 323–326.

13–А. Подрябинкин, Д.А. Элементы квантовой логики для защиты информации / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения III Белорусско-российской науч.-техн. конф., 23–27 мая 2005 г. / БГУИР, Минск, 2005. – С. 78–79.

14–А. Podryabinkin, D.A. Decoherence rate of the quantum state of silicon / D.A. Podryabinkin // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures: proceedings of the International Conference Nanomeeting – 2007, Minsk, Belarus, 22–25 may 2007 / Word Scientific Publishing Co., Singapore, 2007. – P. 36–38.

Тезисы докладов на научных конференциях

15–А. Подрябинкин, Д.А. Декогеренция квантовых состояний в вычислительном кластере на основе цепочек магнитного изотопа кремния / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк // Технические средства защиты информации: материалы докладов и краткие сообщения IV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 26 мая – 2 июня, 2006 г. / БГУИР, Минск, 2006. – С. 66.

16–А. Подрябинкин, Д.А. Декогеренция квантовых состояний в вычислительном модуле на основе ступенчатой кремниевой наноструктуры / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк, В.Е. Борисенко // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 25–29 сент., 2006 г. / БГУИР, Минск, 2006. – С. 76.

17–А. Подрябинкин, Д.А. Декогеренция квантовых состояний ансамблевых кубит в кремниевом вычислительном кластере / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк // Современные средства связи: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–28 сент., 2007 г. / Высш. гос. колледж связи, Минск, 2007. – С. 67.

18–А. Подрябинкин, Д.А. Декогеренция квантовых состояний в вычислительном модуле на основе ступенчатой кремниевой наноструктуры / Д.А. Подрябинкин, А.Л. Данилюк // Современные средства связи: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 окт., 2008 г. / Высш. гос. колледж связи, Минск, 2008. – С. 158.

19–А. Данилюк, А.Л. Поляризация ядерных спинов ансамблевых кубит в кремниевом квантовом вычислительном кластере / А.Л. Данилюк, Д.А. Подрябинкин // Современные средства связи: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29 сент.–1 окт., 2009 г. / Высш. гос. колледж связи, Минск, 2009. – С. 123.



РЭЗЮМЭ

Падрабінкін Дзяніс Аркадзьевіч

Спінавыя ўласцівасці прыступковых нанаструктур крэмнія з ізатопа²⁹Si

Ключавыя словы: крэмній, ізатоп ^{29}Si , сістэма спінаў, нанаструктура, трыплетны цэнтр, палярызацыя, дэкагерэнцыя, магнітнае поле, квантавая апрацоўка інфармацыі.

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцяў праявы спінавых уласцівасцяў нанаструктур, утвораных атамамі ізатопа ^{29}Si і трыплетнымі цэнтрамі кісларод-вакансія крэмнія на прыступках віцынальных паверхняў монакрышталічнага крэмнія, для стварэння на іх аснове інтэгральных элементаў для квантавай апрацоўкі інфармацыі.

Метады даследавання: мадэляванне спінавай дынамікі з дапамогай ураўнення Шрэдзінгера з комплексным гамільтаніанам пры наяўнасці бесперапынных вымярэннях.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Праведзена мадэляванне інжэкцыйнай палярызацыі ядзерных спінаў у крэмніевай ступеньчатай нанаструктуры, якая змягчае ў якасці ансамблевых кубіт ланцужкі магнітнага ізатопа крэмнія ^{29}Si , пры іх звыштонкім узаемадзеянні з узбуджанымі трыплетнымі цэнтрамі. Устаноўлена магчымасць узнікнення самападтрымліванай палярызацыі спінаў ядраў. Распрацавана мадэль і атрыманы ўраўненні, якія апісваюць працэс дэкагерэнцыі квантавых станаў у ансамблевым кубіце ў залежнасці ад колькасці атамаў ^{29}Si у ланцужку, адлегласці ад ланцужка да трыплетнага цэнтра, ступені пачатковай кагерэнтнасці ядзерных спінаў. Устаноўлена, што з памяншэннем адлегласці ад трыплетнага цэнтра да кубіта і з павялічэннем колькасці атамаў у кубіце хуткасць дэкагерэнцыі расце. Прапанавана кампануюка квантавай вылічальнай структуры, якая выкарыстоўвае ансамблевы варыянт арганізацыі вылічэнняў. Разлічаны крытэрыі эфектыўнай працы крэмніевай вылічальнай нанаструктуры, якая змягчае ў якасці ансамблевых кубіт ланцужкі магнітнага ізатопа крэмнія ^{29}Si з узбуджанымі трыплетнымі цэнтрамі кісларод-вакансія крэмнія. На аснове атрыманых дадзеных аб градыенту магнітнага поля, палярызацыі ядраў у поле трыплетнага цэнтра прапанавана нанаструктура для рэалізацыі лагічных элементаў «НЕ» і «Кантраляванае НЕ».

Вобласць прымянення. Крэмніевыя ступеньчатыя нанаструктуры, якія змягчаюць ланцужкі магнітных ізатопаў крэмнія, могуць быць выкарыстаны для стварэння інтэгральных мікрасхем, якія змягчаюць квантавыя каналы апрацоўкі і перадачы інфармацыі (для квантавай крыптаграфіі) і для лагічных элементаў прылады для квантавых вылічэнняў.

РЕЗЮМЕ

Подрябинкин Денис Аркадьевич

СПИНОВЫЕ СВОЙСТВА СТУПЕНЧАТЫХ НАНОСТРУКТУР КРЕМНИЯ С ИЗОТОПОМ ^{29}Si

Ключевые слова: кремний, изотоп ^{29}Si , система спинов, наноструктура, триплетный центр, поляризация, декогеренция, магнитное поле, квантовая обработка информации.

Цель работы: установление закономерностей проявления спиновых свойств наноструктур, образованных атомами изотопа ^{29}Si и триплетными центрами кислород-вакансия кремния на ступеньках вицинальных поверхностей монокристаллического кремния, для создания на их основе интегральных элементов для квантовой обработки информации.

Методы исследования: моделирование спиновой динамики с помощью уравнения Шрёдингера с комплексным гамильтонианом при наличии непрерывных измерений.

Полученные результаты и их новизна. Проведено моделирование инжекционной поляризации ядерных спинов в кремниевой ступенчатой наноструктуре, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si , при их сверхтонком взаимодействии с возбужденными триплетными центрами. Установлена возможность возникновения самоподдерживающейся поляризации спинов ядер. Разработана модель, описывающая процесс декогеренции квантовых состояний в ансамблевом кубите в зависимости от количества атомов ^{29}Si в цепочке, расстояния от цепочки до триплетного центра, степени начальной когерентности ядерных спинов. Установлено, что с уменьшением расстояния от триплетного центра до кубита и с увеличением количества атомов в кубите скорость декогеренции растет. Предложена компоновка квантовой вычислительной структуры, использующая ансамблевый вариант организации вычислений. Рассчитаны критерии эффективной работы кремниевой вычислительной наноструктуры, содержащей в качестве ансамблевых кубит цепочки магнитного изотопа кремния ^{29}Si и триплетные центры кислород-вакансия кремния. На основе полученных данных о градиенте магнитного поля и поляризации ядер в поле триплетного центра предложена наноструктура для реализации логических элементов «НЕ» и «Контролируемое НЕ».

Область применения. Кремниевые ступенчатые наноструктуры, содержащие цепочки магнитных изотопов кремния, могут быть использованы для создания интегральных микросхем, содержащих квантовые каналы обработки и передачи информации (для квантовой криптографии) и для логических элементов устройства для квантовых вычислений.

SUMMARY
Denis A. Podryabinkin

Spin properties of stepped silicon nanostructures with ^{29}Si isotope

Keywords: silicon, ^{29}Si isotope, system of spins, nanostructure, triplet center, polarization, decoherence, magnetic field, quantum information processing.

Objective of the research: is to determine the regularities of spin properties of nanostructures formed by ^{29}Si isotopes and oxygen-silicon vacancy triplet centers on the steps of vicinal single-crystal silicon surfaces in order to design on their basis elements for quantum information processing.

Methods of investigation: simulation of spin dynamics with the help of the Schrodinger equation with complex Hamiltonian in the presence of continuous measurements.

The results obtained and their novelty. Injection polarization of nuclear spins in silicon stepped nanostructures containing chains of the magnetic ^{29}Si isotope as ensemble qubits is simulated taking into account the hyperfine interaction of the nuclei with excited triplet centers formed by oxygen-silicon vacancy complexes. The possibility of a self-maintaining nuclear spin polarization initiated by an external magnetic field is determined. The model is developed and the equations are obtained to describe the process of decoherence of quantum states in the ensemble qubit depending on the number of ^{29}Si atoms in the chain, the distance from the chain to the triplet center, and the initial degree of coherence of nuclear spins. It was established that upon a decrease of the distance from the triplet center to the qubit and upon an increase of the number of atoms in a qubit the rate of decoherence increases. The layout of the quantum computing structure is proposed which uses an ensemble variant of the computing processing. The efficiency criteria of silicon computing nanostructure containing the chains of ^{29}Si magnetic isotope as ensemble qubits taking into account the hyperfine interaction of ^{29}Si nuclei with the excited oxygen-silicon vacancy triplet centers are calculated. On the basis of the data for the magnetic field gradient, the nuclear polarization in the triplet center field the nanostructure is proposed for implementation of logic elements «NOT» and «Controlled NOT».

Recommendations for application. The silicon stepped nanostructures containing chains of silicon magnetic isotopes can be used for formation of integrated circuits with the quantum channels of processing and transmission of information (for quantum cryptography) and for the logical components of quantum computing devices.

Научное издание

ПОДРЯБИНКИН ДЕНИС АРКАДЬЕВИЧ

**СПИНОВЫЕ СВОЙСТВА СТУПЕНЧАТЫХ НАНОСТРУКТУР КРЕМНИЯ
С ИЗОТОПОМ ^{29}Si**

по специальностям

05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы,

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 13.08.2012.	Формат 60x84 $^{1}/_{16}$.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 384.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6