

На правах рукописи



Цуканов Александр Викторович

**Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим
управлением в квантовых вычислениях**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва-2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте Российской академии наук (ФТИАН РАН).

Научный консультант: Лукичев Владимир Федорович, доктор физико-математических наук, член-корр. Российской академии наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологический институт Российской академии наук, профессор

Официальные оппоненты: Моисеев Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой оптики и информатики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского, директор Казанского квантового центра, профессор

Фельдман Эдуард Бенъяминович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией спиновой динамики и спинowego компьютеринга Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химической физики Российской академии наук

Рудой Юрий Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор международного уровня Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Российский университет дружбы народов, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ)

Защита состоится 14 декабря 2017 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект д. 36 к. 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН и на сайте <http://www.ftian.ru>.

Автореферат разослан «__»_____2017 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.204.01
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

Актуальность темы исследования

Полупроводниковые квантовые точки (КТ), часто называемые искусственными атомами, привлекают внимание многих исследователей уже в течение почти двадцати лет [1]. Они могут быть получены разными способами, самыми распространенными из которых являются а) спонтанная конденсация небольших объемов – «островков» одного полупроводникового компонента, который эпитаксиально наносится на другой компонент (например, InAs на GaAs) и б) формирование потенциальных минимумов (иногда называемых «электронными резонаторами») в двумерном электронном газе при помощи электрических и магнитных полей. Заряженная частица, локализованная внутри КТ, имеет дискретный спектр собственных состояний, свойственный конкретному эффективному потенциалу, удерживающему электрон. Его глубина задается величиной скачка дна зоны проводимости на границе, отделяющей InAs КТ от окружающего её GaAs, или контролируется напряжением на электрических контактах. Интерес к данным объектам во многом обусловлен возможностью эффективно управлять их спектральными свойствами за счет выбора химического состава, формы и размеров.

Практическое использование КТ охватывает широкий класс современных высокотехнологичных устройств, таких, как генераторы неразличимых одиночных фотонов для протоколов квантовой криптографии, лазеры терагерцевого диапазона, одноэлектронные и фотонные транзисторы и др. Особой популярностью они пользуются и у специалистов по проектированию квантовых компьютеров [2]. Отметим несколько причин. Во-первых, на основе КТ возможно создание масштабируемых твердотельных квантовых регистров на базе уже существующих полупроводниковых микро- и нанотехнологий. Во-вторых, квантовая информация в КТ может кодироваться несколькими способами в различные квантовые степени свободы КТ (орбитальные, экситонные и спиновые состояния электронов) с сохранением когерентности в течение достаточного долгого времени при умеренно низкой температуре. В-третьих, комплексы КТ успешно интегрируются в гибридные фотонные системы и квантовые сети, содержащие разнородные квантовые компоненты. Эти свойства полупроводниковых КТ делают их реальными кандидатами на роль кубитов – элементарных носителей квантовой информации.

С другой стороны, в последние несколько лет наблюдается быстрое развитие теории и технологии изготовления твердотельных оптических систем – волноводов, фотонных кристаллов и микрорезонаторов (МР) [3]. Подбирая определенным образом материал, геометрию и внутреннюю структуру этих объектов, оказывается возможным задавать и контролировать их спектральные свойства. Существует несколько разновидностей таких

оптических резонаторов, изготавливаемых на основе полупроводниковых, диэлектрических и металлических микро- и наноструктур. Это брэгговские слоистые резонаторы, микродиски, микросферы и микрокольца, поддерживающие моды шепчущей галереи, и дефекты в фотонных кристаллах. В этой связи ведется разработка способов интегрирования КТ в данные структуры, в частности, с целью организации взаимодействия между двумя удаленными КТ за счет когерентного обмена квантом возбуждения через транспортную фотонную моду. Однако функциональные свойства подобных гибридных КТ-систем существенным образом зависят от типа, материала, размера и, очевидно, от качества изготовления фотонной структуры. Представляется интересным и актуальным исследование путей поиска оптимальных конфигураций и параметров фотонных сетей, которые обеспечивали бы надежную связь между произвольными КТ-кубитами в регистре.

Степень разработанности темы исследования

Состояние теоретических разработок и экспериментальных методов реализации квантовых вычислений на КТ, представленное публикациями в научной литературе, подробно отражено в обзорной Главе 1. Исторически, в качестве первых прототипов кубитов использовались КТ, получаемые электростатическим способом на основе двумерного электронного газа [4]. Достоинство данной схемы состоит в простоте организации управления динамикой электронов в КТ, однако существенным недостатком здесь является высокий уровень шума, обусловленный флуктуациями напряжения на контролирующих форму КТ затворах. Еще одна идея реализации квантовых вентилях на КТ заключается в кодировке информации в спиновые состояния электрона [5]. Здесь тоже был достигнут определенный прогресс в экспериментальной области, однако сохранение спиновой когерентности, в отличие от орбитальной, требует значительно больших затрат, связанных с необходимостью работы в режиме сверхнизких температур. Также была предложена схема запутывания состояний экситонных кубитов на основе двойных квантовых точек (ДКТ) в МР и переноса квантовой информации в виде фотона между удаленными кубитами по волноводу [6]. Достоинство такой схемы состоит в том, что указанные операции не требуют применения внешнего лазерного импульса. Это значит, что при выполнении квантовых операций можно ограничиться варьированием электрического напряжения на управляющих затворах ДКТ и контролем числа фотонов МР в режиме ближнего поля посредством одномодового волновода. Тем не менее, как показывает эксперимент, кодировка квантовой информации, связанная с наличием/отсутствием экситона(ов) или трионных комплексов в ДКТ, имеет существенный недостаток. Именно, время жизни экситона в КТ, как правило, составляет несколько сотен пикосекунд, что примерно соответствует времени выполнения одной квантовой операции. Необходимо увеличить это

время хотя бы на два порядка, чтобы выполнялись условия теоремы о помехоустойчивых квантовых вычислениях.

Главными препятствиями на пути создания полномасштабного квантового компьютера на базе КТ являются а) сложность высокоточного позиционирования отдельных КТ в полупроводниковой матрице, б) проблема синтеза КТ заданных размеров и формы, в) необходимость оптимальной ориентации КТ относительно управляющих устройств, а также г) трудности, связанные с манипуляциями отдельными электронами (экситонами, электронными спинами) и организацией взаимодействия между ними. Однако в последние несколько лет наблюдается определенный прогресс в экспериментальных исследованиях по всем упомянутым направлениям. Мы акцентируем внимание на результатах, полученных для КТ в твердотельных полупроводниковых МР. В недавних работах сообщается о контролируемом размещении пирамидальных InGaAs/GaAs-точек в виде упорядоченной структуры внутри полупроводникового двумерного фотонного кристалла [7]. Также удалось получить массив (квадратную решетку) ДКТ, разделенных GaAs барьером толщиной 10 нм, внутри брэгговского МР на основе слоистой гетероструктуры [8]. В данных исследованиях расстояние между КТ составляло около 1 мкм, характерный размер КТ – 10 нм, а погрешность расположения была менее 50 нм. Далее, упорядоченный квазилинейный массив КТ формировался вдоль края микродиска диаметром 4 мкм и толщиной 250 нм в пучностях электромагнитного поля одной из его собственных мод [9]. В зависимости от условий процесса образования КТ их линейная плотность варьировалась от 1 до 6 мкм⁻¹. Во всех этих работах наблюдалось интенсивное взаимодействие КТ и МР, приводящее к модификации спектров поглощения/испускания обеих подсистем. Электрический контроль частот КТ был также продемонстрирован [10], при этом важно отметить, что удалось достичь независимой настройки в резонанс с полем частоты КТ, лежащей в одном слое структуры, тогда как частота КТ, находящейся в другом слое точно над первой КТ на расстоянии 90 нм, не менялась.

Цели и задачи работы

Целями данной работы являются:

- разработка полупроводниковой структуры (квантового регистра) на основе одноэлектронных КТ с лазерным и электростатическим управлением для помехоустойчивого кодирования, обработки, транспортировки и хранения квантовой информации;
- исследование возможности построения полномасштабного твердотельного квантового компьютера на основе КТ и их ансамблей, находящихся в высокодобротных оптических МР и квантовых сетях на их основе.

Для достижения поставленных целей были решены следующие **задачи**:

1. Теоретическое изучение влияния электромагнитного импульса на когерентную динамику одного и двух электронов в ДКТ с демонстрацией возможности селективного туннельно-оптического переноса электрона между КТ в резонансном и рамановском режимах.
2. Исследование способов кодировки квантовой информации и реализации квантовых операций на зарядовых и спиновых кубитах посредством лазерного и электростатического управления орбитальными и спиновыми состояниями электронов в КТ или в донорных атомах.
3. Изучение когерентного транспорта электрона в многоямных квазиодномерных наноструктурах под действием резонансного поля и исследование возможности масштабирования квантового регистра на основе КТ путем обусловленных транспозиций пробного заряда во вспомогательной структуре.
4. Изучение спектральных характеристик оптической твердотельной структуры, состоящей из ДКТ и МР и представляющей основу для реализации полупроводникового масштабируемого зарядового кубита, путем моделирования диссипативной динамики одноэлектронной ДКТ во внешнем (пробном) лазерном поле.
5. Численное моделирование квантовой динамики запутанных состояний одной или нескольких КТ, помещенных в МР, в рабиевском и рамановском режимах в рамках подходов Шредингера и Линдблада и анализ диссипативных эффектов, расчет времен и точности выполнения одно-, двух- и трехкубитных квантовых операций на КТ.
6. Разработка концепции квантового узла на базе КТ и МР для хранения квантовой информации, состоящего из частотного конвертора и кубита памяти.

Научная новизна работы

1. Теоретически исследована когерентная динамика зарядового ДКТ кубита с электростатическим управлением. Получены аналитические выражения для операторов эволюции одного и двух кубитов во внешнем медленно меняющемся электрическом поле затворов, указаны параметры структуры и поля, соответствующие основным однокубитным операциям. Рассмотрена возможность организации двухкубитной операции CNOT как в идеальном случае, так и при наличии паразитной динамики.
2. Аналитически рассчитана вероятность туннельно-оптического переноса электрона в ДКТ как функция параметров структуры и лазерного импульса. Показано, что эта вероятность может быть близка к единице. Для двухэлектронной ДКТ рассчитаны зависимости амплитуд вероятности от длительности импульса, предложена схема генерации запутанного состояния электронных спинов с помощью эффективного обменного взаимодействия.
3. Разработан способ кодирования и обработки квантовой информации при помощи возбужденных состояний одиночной полупроводниковой КТ (ОКТ) и проведено

теоретическое исследование проблемы организации контролируемого взаимодействия между зарядовыми кубитами в трехкубитном кластере.

4. Предложен простой алгоритм реализации нетривиального трехкубитного вентиля Тоффли посредством электронных возбуждений во вспомогательной структуре, обусловленных состоянием трехкубитного кластера.
5. Изучена специфика транспозиции пробного заряда во вспомогательных линейных и планарных структурах из туннельно-связанных КТ и предложена процедура оптимизации алгоритма транспозиции на основе численного моделирования путем надлежащего подбора параметров управляющих полей и структуры.
6. Предложен способ генерации запутанных состояний кластера из девяти зарядовых ДКТ кубитов и рассмотрена возможность применения кода Шора с целью защиты состояния кубитов от квантовых ошибок.
7. Исследованы способы кодировки квантовой информации и реализации квантовых операций на зарядовых кубитах посредством оптического управления орбитальными состояниями валентных электронов в донорных атомах в полупроводниковой матрице, рассмотрена возможность масштабирования данной схемы.
8. Исследована возможность выполнения одно- и двухкубитных операций на зарядовых ДКТ кубитах, когерентно взаимодействующих с квантовым полем МР, разработаны несколько способов управления их состояниями и различные варианты реализации нетривиальных двухкубитных вентилей CNOT и CZ, а также генерации запутанных многокубитных состояний Шора, рассчитано время выполнения данных вентилей с учетом фотонной диссипации и электронной релаксации.
9. Предложена оригинальная схема твердотельного полномасштабного квантового компьютера на одноэлектронных ДКТ, интегрированных в полупроводниковый МР, с возможностью организации взаимодействия между кубитами посредством оптической квантовой сети с электростатическим управлением.
10. Предложен новый способ записи квантового состояния транспортного кубита (фотона с телекоммуникационной длиной волны) в ячейку (узел) квантовой памяти на основе одноэлектронной полупроводниковой асимметричной ДКТ. Вспомогательный интерфейс узла представлен МР, частотным ОКТ-конвертором и лазером.

Научная значимость работы

Основные результаты диссертационной работы связаны с фундаментальными и прикладными теоретическими исследованиями свойств зарядовых кубитов на полупроводниковых КТ. Их совокупность позволяет классифицировать работу как научное достижение в интердисциплинарной сфере, связанной с квантовой информатикой,

твердотельной квантовой оптикой и физикой низкоразмерных полупроводниковых структур. Разработанные методы исследований обладают большой степенью универсальности. Помимо применения для описания и анализа статических и динамических свойств квантовых битов с комбинированным оптическим и электростатическим управлением и масштабируемой структуры чипа-регистра, они могут быть задействованы и при проектировании принципиальных схем приборов, которые могут выполнять вспомогательные функции в полномасштабном квантовом компьютере, а также функционировать как независимые устройства.

Практическая значимость работы

1. Усовершенствован аналитический подход и разработан численный подход к описанию когерентной и диссипативной динамики одного и нескольких электронов в ОКТ, ДКТ и многоуровневых наноструктурах на основе КТ.
2. Разработан метод спектроскопического моделирования (пакет программ) динамики и свойств одноэлектронной КТ в МР в субфотонном режиме путем сканирования параметров пробного лазерного импульса и анализа отклика системы.
3. Предложены оригинальные способы быстрой реализации одно-, двух- и трехкубитных операций, а также алгоритм генерации запутанных девятикубитных состояний Шора, на зарядовых КТ кубитах с использованием а) вспомогательной квазилинейной наноструктуры с пробным электроном или б) вспомогательной волноводной оптической структуры с пробным фотоном.
4. Описаны принципиальные схемы планарной архитектуры кластеров и регистров, состоящих из зарядовых ДКТ или донорных кубитов с оптическим (МР и лазер) и электростатическим (затворы) управлением.
5. Развита концепция квантового узла памяти с интерфейсом управления, состоящего из зарядового ДКТ кубита памяти, частотного конвертора на основе ОКТ, МР и лазера, и предложены несколько алгоритмов записи состояния операционного фотонного кубита в инициализированный кубит памяти.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель масштабируемого квантового регистра на основе массива зарядовых ОКТ, ДКТ и донорных кубитов, контактирующих с кулоновским полем пробного электрона во вспомогательной квазилинейной структуре из туннельно-связанных КТ, которая опосредует межкубитное взаимодействие. Нетривиальная эволюция многокубитного состояния регистра осуществляется посредством воздействия на систему резонансного электромагнитного излучения, вызывающего обусловленные переходы между уровнями

вспомогательной структуры, и полей электрических затворов, контролирующих энергии отдельных КТ.

2. Модель масштабируемого квантового регистра на основе массива зарядовых ДКТ кубитов, взаимодействующих с квантовым полем оптической сети из туннельно-связанных МР (фотонной молекулы), с учетом различных диссипативных каналов. Нетривиальная эволюция многокубитного состояния регистра осуществляется посредством воздействия на систему многофотонного (классического) поля лазера, квантового (однофотонного) поля МР, и электрического поля затворов.
3. Оптимизированные по количеству промежуточных шагов алгоритмы реализации двух- и трехкубитных операций CZ и CCZ, базирующихся на условном накоплении фазы, а также вентилей CNOT и Тоффоли, которые могут быть выполнены с высокой точностью в предложенных вариантах масштабируемых квантовых регистров.
4. Процедура записи квантовой информации, закодированной в фоковское состояние телекоммуникационного фотона (транспортного кубита), в инициализированное состояние зарядового ДКТ кубита памяти, которая базируется на методе частотной конверсии с участием полей лазера и МР.

Личный вклад автора

Автором лично получены все основные результаты диссертационной работы, проведен всеобъемлющий обзорный анализ темы, предложен оригинальный дизайн рассмотренных моделей масштабируемых регистров и их основных узлов. Автор самостоятельно формулировал постановку задач, выбирал методы их решения, интерпретировал результаты. В ходе выполнения диссертационной работы автор, где это было возможно, стремился к получению результатов в аналитическом виде, доступном для непосредственного применения. Вместе с тем, им было составлено несколько пакетов программ для численных расчетов по каждому из заявленных выше положений. Все публикации в научных журналах и доклады на конференциях были подготовлены самим автором.

Достоверность полученных результатов

Высокое качество полученных результатов подтверждается публикациями материалов работы в рецензируемых отечественных и международных журналах, а также докладами, представленными на национальных и международных конференциях. Проверка корректности аналитических и численных расчетов осуществлялась путем сравнения результатов, полученных в рамках разработанных моделей, с имеющимися в мировой литературе экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на конференциях: Научная сессия МИФИ (2003, 2004, 2005, 2011, 2012, 2013 гг.); The International Conference “Micro- and Nanoelectronics” (ICMNE) with the Extended Session "Quantum Informatics" (QI) (2002, 2004, 2005, 2007, 2009, 2012, 2014, 2016 гг.); International Conference “Russian Supercomputer Days”, Quantum Computing Workshop, Moscow, 2015.

Публикации

По результатам исследований опубликована 31 работа в реферируемых журналах (из которых – 27 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов), 6 глав в монографиях, см. [A1 – A37].

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, десяти глав, выводов и заключения, списка литературы. Содержит 371 страницу, включая 126 рисунков и 338 библиографических ссылок.

Краткое содержание работы

Во введении сформулированы цели и задачи, обоснованы актуальность и новизна работы, изложены ее научная и практическая значимость и защищаемые положения.

Глава 1. Обзор литературы. В обзорной главе проанализирован выбор основных направлений исследований по теме диссертации, описаны методы и подходы для теоретического описания и моделирования КТ и МР, а также кратко сформулированы основные результаты отечественных и зарубежных исследований, связанных с использованием полупроводниковых КТ в квантовых вычислениях [A25 – A29].

Глава 2. Двойная квантовая точка в роли зарядового кубита с электрическим управлением.

Цель настоящей главы – выявить основные закономерности эволюции электронов в полупроводниковых ДКТ - зарядовых кубитах - под действием переменных внешних полей и рассмотреть различные способы кодировки квантовой информации [A11, A14]. Некоторые возможные варианты масштабируемой архитектуры твердотельного квантового компьютера, базирующегося на подобной геометрии зарядовых кубитов, были рассмотрены в работах [11], [12]. Используя приближение сильной связи для одно- и двухэлектронного гамильтонианов, мы получили аналитические решения уравнения Шредингера, описывающие когерентную динамику одного и двух кубитов, и показали, что каждая квантовая операция определяется

соответствующим набором амплитуд и длительностей электрических импульсов, подаваемых на затворы. Известно, что когерентность квантовой эволюции кубита обеспечивается за счет изоляции логического подпространства состояний системы от окружения, представленного, в том числе, и теми состояниями системы, которые не используются для организации квантовых вычислений. Влияние внешних степеней свободы, в частности, фотонного и фононного резервуаров, а также зарядовых шумов, изучалось в работах [18] и [12]. Мы рассматриваем квантовые ошибки, вызываемые внешними полями или/и обусловленные неидеальным контролем параметров системы. Они могут существенно усложнить выполнение квантовых алгоритмов. Используемая нами модель позволяет продемонстрировать процесс обработки квантовой информации в присутствии источников паразитной эволюции и указать количественные критерии, которым должны удовлетворять и структура, и поле, чтобы минимизировать влияние подобных эффектов.

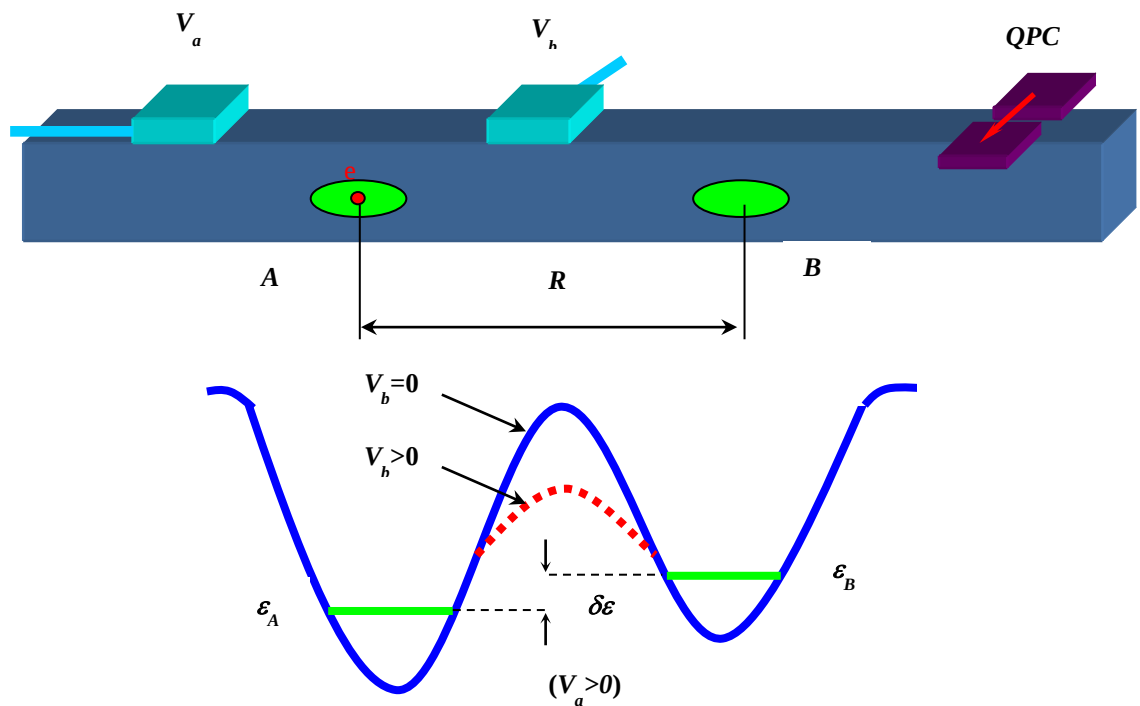


Рис. 1. Схема зарядового кубита, представленного наноструктурой из двух туннельно-связанных квантовых точек A и B. Энергетический спектр электрона контролируется при помощи электрических полей, подаваемых на затворы V_a и V_b . Квантовый точечный контакт QPC используется для считывания состояния кубита. Внизу: энергетическая диаграмма одноэлектронной наноструктуры. Показаны логические состояния кубита, представленные локализованными в точках A и B электронными орбиталями с энергиями ϵ_A и ϵ_B , соответственно. Сплошная линия изображает потенциальный рельеф структуры вдоль оси C, если напряжение на затворе V_b отсутствует, а пунктирная линия – если на затвор V_b подано положительное напряжение. Кроме того, поле затвора V_a создает разность энергий $\delta\epsilon = \epsilon_B - \epsilon_A$ логических состояний.

Как мы увидели, существуют несколько вариантов реализации нетривиальных квантовых операций, базирующихся на разных способах выбора логических состояний двух кубитов, и наиболее оптимальными из них являются те, что используют собственные состояния гамильтониана структуры. Помимо условий, которым должны удовлетворять параметры структуры и внешнего поля, чтобы эволюция системы отвечала той или иной операции, мы указали также и критерии оптимизации точности воспроизведения квантовых операций.

Глава 3. Двойная квантовая точка в роли зарядового кубита с лазерным управлением.

В данной главе мы теоретически исследовали квантовую динамику электрона при воздействии лазерного импульса на наноструктуру, состоящую из двух туннельно-связанных КТ [A3-A6, A10]. С учетом возможного различия размеров КТ получено аналитическое выражение для вероятности индуцированного перехода электрона между состояниями, локализованными в разных КТ. Этот переход осуществляется посредством резонансного возбуждения электрона на близкий к краю барьера уровень ДКТ, волновая функция которого делокализована между КТ (аналог осцилляций Раби в атомной трехуровневой схеме), см. рис. 2. Найдены зависимости длительности и частоты импульса, при которых вероятность перехода максимальна, от энергетического спектра наноструктуры и дипольных матричных элементов. В рамках модели КТ почти кубической формы сформулированы критерии, которым должны удовлетворять геометрические и энергетические характеристики наноструктуры (размеры КТ, расстояние между ними, высота разделяющего их барьера), чтобы выполнялись условия резонансного перехода электрона. Сделан вывод, что незначительное технологическое различие размеров квантовых точек хотя и приводит к уменьшению вероятности перехода (операции NOT), но не очень существенному (до $p \approx 0.9$). Мы полагаем, что на современном уровне технологии изготовления наноструктур этот эффект может быть обнаружен экспериментально. Оптимальные параметры лазерного импульса при этом должны определяться исходя из характеристик конкретной наноструктуры, либо же подбираться опытным путем.

Далее, с помощью наглядной и простой модели нами был рассмотрен метод построения решений для четырехуровневой ДКТ системы (прототипа зарядового кубита) во внешних полях общего вида. При этом полученный результат обобщает сразу несколько возможных вариантов реализации кубита (на ОКТ или ДКТ). Основным параметром, задающим кодировку логических состояний и тип кубита, является отношение туннельной и оптической частот Раби. Меняя его величину, можно проследить переход из режима ДКТ в режим ОКТ. Кроме того, нам удалось аналитически рассчитать поправку к RWA-решению и оценить ошибку, связанную с использованием этого распространенного приближения. Это дает возможность применять ту

или иную схему в качестве исходной (более простой), но с достаточным математическим обоснованием, вытекающим из анализа динамики в рамках общей четырехуровневой модели.

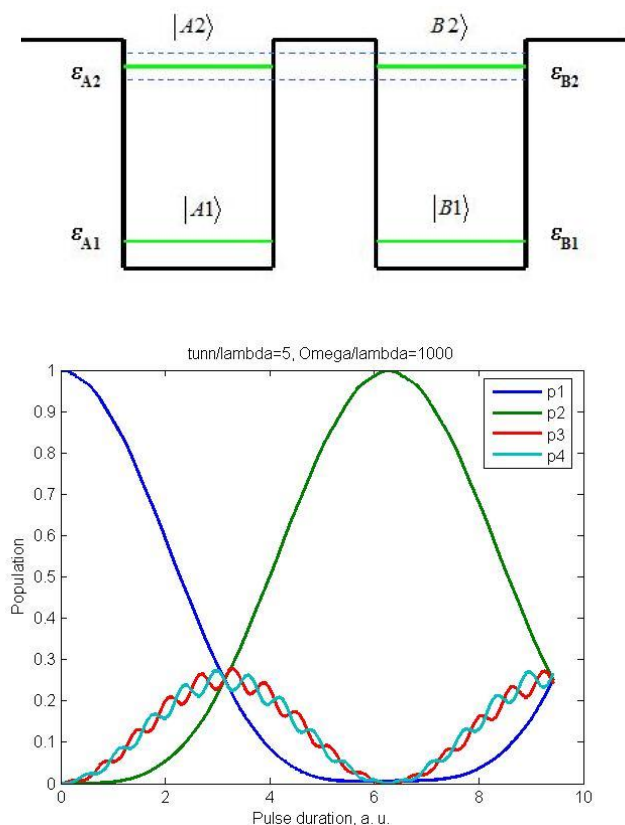


Рис. 2. Вверху: схема энергетических уровней наноструктуры, состоящей из двух квантовых точек (А и В). Здесь ϵ_{A1} , ϵ_{A2} , ϵ_{B1} , ϵ_{B2} — энергии основных и возбужденных размерно-квантованных уровней энергии электрона в изолированных КТ. Пунктиром отмечены энергии делокализованных между КТ состояний, образующихся за счет эффекта туннелирования.

Внизу: графики зависимостей заселенностей уровней одноэлектронной ДКТ от длительности прямоугольного лазерного импульса, отвечающие операции NOT. Здесь p_1 и p_2 — вероятности обнаружить электрон в основных состояниях А1 и В1 ДКТ, а p_3 и p_4 — вероятности обнаружить электрон в возбужденных состояниях А2 и В2 ДКТ, соответственно.

В качестве примера, иллюстрирующего дальнейшее развитие модели, была исследована когерентная динамика электрона в структуре из трех КТ в резонансном лазерном поле. Волновые функции и энергии рабочих уровней найдены в приближении высоких барьеров. Показано, что перенос электрона между точками описывается двухуровневой схемой с диагональными переходами. Для того чтобы состояния, имеющие небольшой сдвиг по энергии, могли выполнять разные функции, используются особенности потенциального рельефа. При этом за счет выбора структурных параметров практически полностью исключается уход электрона из структуры, а также запутывание близкорасположенных уровней и электрон — фононная релаксация.

Глава 4. Двойная квантовая точка в роли зарядового кубита с лазерным управлением.

В 1998 году Лосс и ДиВинченцо предложили кодировать квантовую информацию в спины электронов, находящихся в ДКТ, сформированной затворами [5]. В их модели переменное магнитное поле использовалось для осуществления однокубитных вращений, а электростатическое поле применялось для организации взаимодействия между кубитами. Помимо этого, постоянное магнитное поле может быть наложено на структуру, чтобы более точно регулировать обменное взаимодействие электронов. Благодаря контролю обменного

интеграла в течение времени действия импульса напряжения на центральном затворе, разделяющем КТ, оказывается возможным реализовать нетривиальные двухкубитные операции, такие, как XOR и т.н. «корень из SWAP», а также генерировать запутанные состояния электронных спинов. В настоящей главе мы предлагаем альтернативный способ генерации максимально запутанного белловского состояния спинов, а также операции NOT. Для этого нами была разработана оригинальная и простая схема управления квантовым состоянием двух взаимодействующих электронов в ДКТ с использованием двух лазерных импульсов, см. рис. 3, частоты которых отвечают резонансным частотам системы [A7, A9, A13]. Данная схема является обобщением рассмотренной выше модели для зарядового кубита. Как и в одноэлектронном случае, резонансный характер взаимодействия с внешним источником обеспечивает высокую избирательность при возбуждении того или иного перехода между основными вырожденными (логическими) и возбужденными (вспомогательными) состояниями. При этом электронная плотность циркулирует между двумя основными состояниями (1 и 2), четырьмя состояниями с одним возбужденным электроном (5, 6, 7, 8) и состоянием 13 с двумя возбужденными электронами, в котором их спины находятся в запутанном (синглетном) состоянии. В результате возникает управляемое эффективное обменное взаимодействие спинов возбужденных электронов, позволяющее получить их требуемую конфигурацию в заданный момент времени. В частности, реализуется операция инверсии спинов: $1 \equiv \uparrow\downarrow \leftrightarrow 2 \equiv \downarrow\uparrow$.

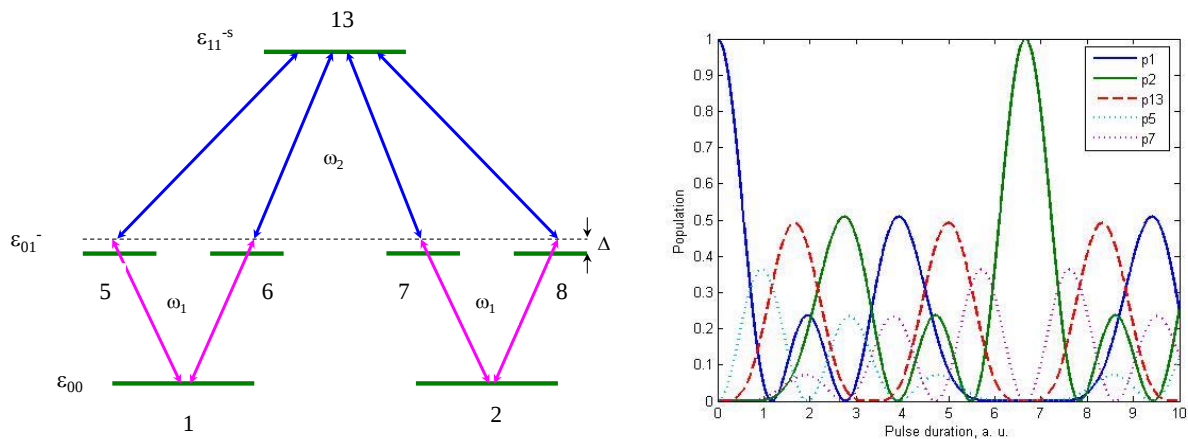


Рис. 3. Слева: схема переходов в двухэлектронной симметричной ДКТ между логическими состояниями $|1\rangle$ и $|2\rangle$ и вспомогательными состояниями $|5\rangle - |8\rangle$ и $|13\rangle$ при наложении двух лазерных импульсов с частотами ω_1 и ω_2 (двухфотонный резонанс). Справа: графики зависимостей населенностей от длительности лазерного импульса для строгого двухфотонного резонанса, иллюстрирующие спиновую инверсию.

Глава 5. Квантовая сеть на основе одноэлектронной цепочки квантовых точек.

Осуществление контролируемого взаимодействия между различными (удаленными) частями квантового регистра остается одной из серьезных проблем на пути реализации

полномасштабных квантовых вычислений. Возможное решение данной проблемы состоит в кодировании квантовой информации посредством спиновых и зарядовых состояний электронов, которые затем могут быть транспортированы от одного кубита к другому через вспомогательную структуру. В теоретических схемах обработки квантовой информации с помощью твердотельных наноструктур рассматриваются такие системы, состоящие из упорядоченных массивов специфических квантовых узлов (квантовые точки, квантовые ямы, квантовые нити, донорные атомы) и использующие электростатический контроль туннелирования для когерентного транспорта электрона вдоль структуры (см. обзор в [A8]). Протоколы переноса электрона, изучаемые в большинстве работ, используют методику стимулированного адиабатического прохождения, заимствованную из квантовой оптики. Как было показано, данные схемы являются многообещающими благодаря их устойчивости к нежелательным переходам из транспортного состояния. Однако, поскольку схемы, использующие электростатические импульсы, весьма чувствительны к отклонениям параметров импульсов от заданных, требования к дизайну управляющих полей остаются довольно жесткими. Это делает реализацию подобных схем достаточно сложной экспериментальной задачей.

Мы рассматриваем альтернативный механизм одноэлектронного переноса между крайними квантовыми ямами (КЯ) вспомогательной структуры [A8, A15, A19, A21]. Пробный электрон, изначально занимавший основное состояние одной КЯ, приводится во взаимодействие с близлежащим кубитом, и его состояние оказывается запутанным с состоянием кубита (рис. 4). Затем электрон переводится в другую КЯ, расположенную рядом с другим кубитом, перенося таким образом информацию о состоянии первого кубита и организуя не прямое взаимодействие между кубитами. В отличие от традиционных способов, использующих коррелированные переключения затворов для перемещения электронного заряда, мы используем оптическую Λ -схему переноса на основе резонансных переходов, предложенную для осуществления однокубитных операций на зарядовом кубите. В этом случае требуется, по крайней мере, два лазерных резонансных импульса, а полный перенос электрона происходит за время порядка 10-100 пс при использовании полей гораздо меньшей интенсивности, чем в способах, описанных выше. Мы указываем, как следует выбирать параметры импульса и структуры, чтобы оптимизировать процесс селективного электронного переноса между локализованными состояниями наноструктуры. Анализируются зависимости вероятности переноса от амплитуды и частоты импульса, а также от числа ям в структуре. Хотя наши результаты получены для эффективной одномерной структуры, предложенный алгоритм

оптимизации переноса может использоваться и для анализа реальных твердотельных трехмерных структур.

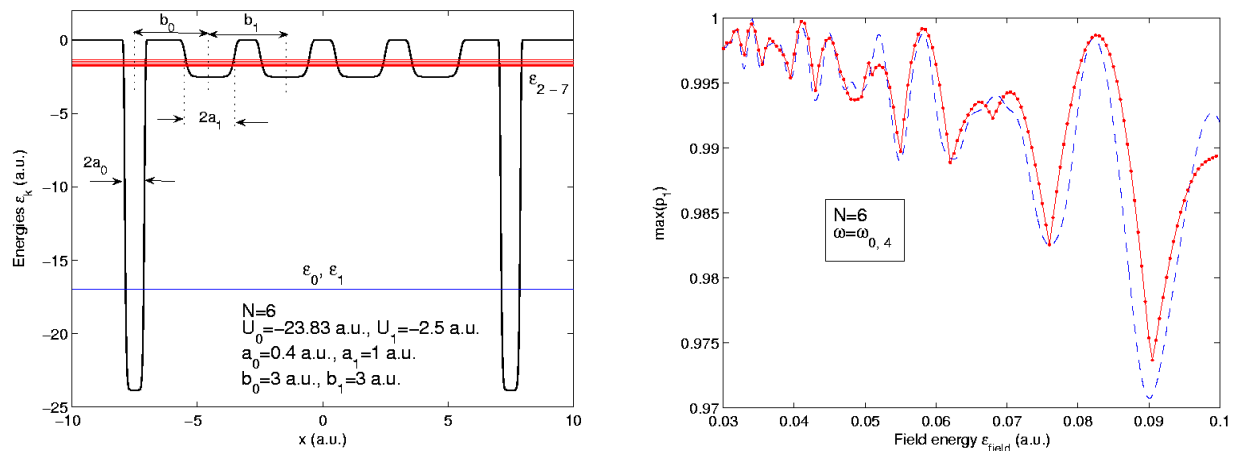


Рис. 4. Слева: одномерная шестиямная наноструктура. Справа: максимальная вероятность переноса электрона в шестиямной структуре как функция энергии поля $\varepsilon_{\text{field}}$. Численные результаты представлены сплошной кривой, аналитическое приближение – пунктирной.

Глава 6. Прототипы квантовых регистров на КТ.

В данной главе описан алгоритм, позволяющий реализовать двух- и трехкубитные операции в кластере из трех зарядовых кубитов, представленных ОКТ [A17, A18, A20]. Вспомогательный ресурс представлен квантовой структурой из четырех КТ, содержащей один (пробный) электрон, см. рис. 5. Энергетический спектр электрона в данной структуре зависит от орбитальных состояний кубитов, расположенных вблизи структуры, вследствие электростатического взаимодействия между ним и электронами кубитов. Следовательно, и резонансные частоты переходов в структуре зависят от состояний кубитов. Существенно, что данные частоты, отвечающие различным состояниям трехкубитного кластера (всего восемь возможных базисных состояний), должны также отличаться друг от друга. В этом случае внешний управляющий импульс будет индуцировать переходы в структуре, если его частота равна частоте перехода для одной из восьми зарядовых конфигураций кластера. В частности, импульс может переводить пробный электрон из основного состояния в возбужденное и наоборот за определенные промежутки времени. Данный процесс приводит к фазовому (условному) сдвигу одного из восьми трехкубитных базисных состояний (рис. 5, правая панель). Это, в свою очередь, дает возможность реализовать произвольную квантовую операцию в логическом подпространстве трех кубитов (например, CZ и CCZ).

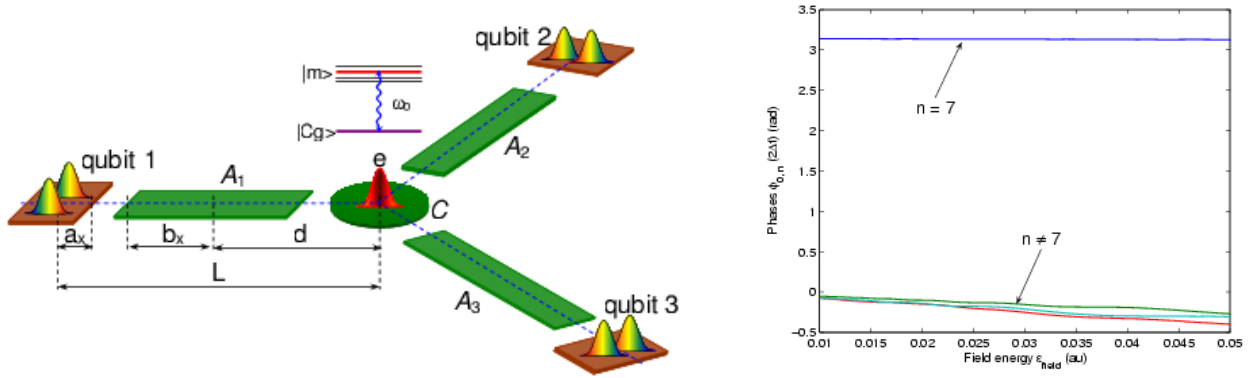


Рис. 5. Слева: схема трехкубитного кластера и вспомогательной структуры. На вставке показан переход между основным и сенсорным состояниями структуры, который используется при реализации условных квантовых операций. Справа: Фазы, накапливаемые основными состояниями структуры как функции амплитуды поля $\mathcal{E}_{field}$.

Поскольку гибридизированные состояния структуры служат в качестве сенсорных состояний, чьи энергии и волновые функции зависят от орбитальных состояний КТ, представляющих кубиты, то параметры структуры должны быть выбраны таким образом, чтобы различные зарядовые конфигурации кластера соответствовали различным частотным сдвигам. Для этого требуется размещать кубиты в непосредственной близости к КТ-антеннам. Тогда частотное разрешение будет достаточным для осуществления селективного возбуждения только одного перехода. Возможность выполнения условных квантовых операций CZ и CCZ позволяет конструировать операции CNOT и Тоффоли, соответственно, путем применения вентиля Адамара к контролируемому кубиту до и после указанных фазовых операций. Согласно общепринятому подходу, трехкубитный (универсальный) вентиль Тоффоли может быть реализован посредством десяти элементарных однокубитных вентилях и шести двухкубитных вентилях CNOT. В нашей схеме данный вентиль требует только четыре операции, а именно, два вентиля Адамара и два $\pi/2$ -инверсионных перехода. Таким образом, предложенный нами алгоритм реализации нетривиальных многокубитных вентилях путем манипуляций со вспомогательной структурой, оказывается гораздо более экономным, чем стандартные алгоритмы, базирующиеся на использовании некоторого универсального набора одно- и двухкубитных вентилях.

Также предложена схема запутывания ДКТ-кубитов в масштабируемом планарном регистре, использующая не прямое взаимодействие между кубитами, которое опосредовано вспомогательной структурой (ВС). Структура сформирована из квазилинейных цепочек КТ и содержит один (пробный) электрон в квантованной части зоны проводимости. Одноэлектронный спектр такой структуры зависит от состояния кубитов из-за кулоновского взаимодействия между пробным электроном и электронами кубитов (рис.6). На основании

последовательного применения процедуры переноса электрона был разработан алгоритм для двух- и многокубитных операций, а также схема помехоустойчивых квантовых вычислений для прототипа квантового регистра из 9ти кубитов (код Шора). Дальнейшая оптимизация данного алгоритма предполагает, в частности, увеличения скорости выполнения операций за счет надлежащего выбора параметров КТ и электромагнитного поля. Мы полагаем, что принцип непрямого взаимодействия в системе полупроводниковых зарядовых кубитов, рассмотренный в данной работе, может быть применен и для более сложных систем.

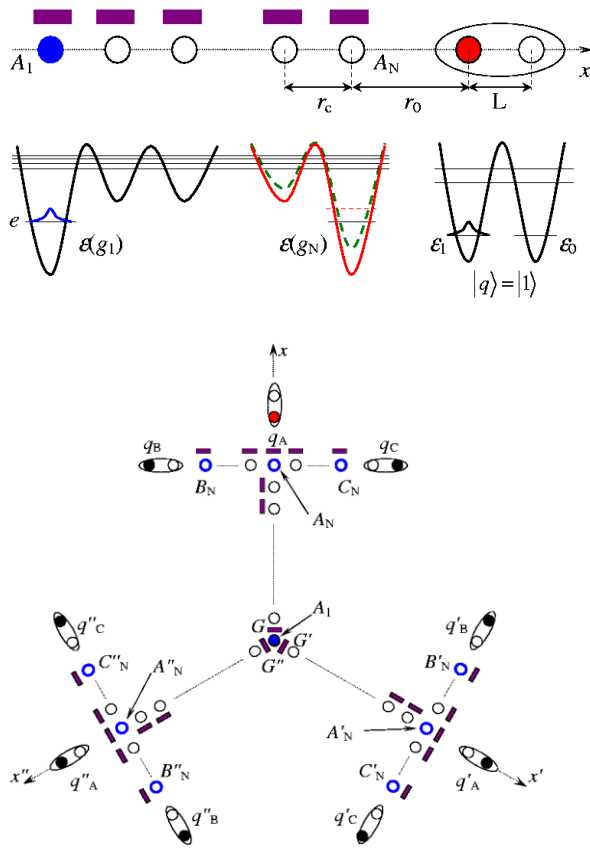


Рис. 6. Вверху: вспомогательная структура, представленная квазилинейной цепочкой КТ (кружки) и снабженная контролирующими затворами (прямоугольники), содержит пробный электрон в основном состоянии $|g_1\rangle$ КТ A_1 . Кубит (одноэлектронная ДКТ) расположен справа от ВС и загружен в логическое состояние $|I\rangle$. Ниже показан потенциальный профиль структуры вдоль оси роста x для случаев, когда компенсирующие напряжения включены (сплошная кривая) или выключены (пунктир). Внизу: схема вспомогательной планарной КТ-структуры, используемой в алгоритме девятикубитного кодирования Шора.

Глава 7. Архитектура-прототип квантового компьютера на КТ и донорных атомах.

В данной главе мы представляем принципиальную схему полномасштабного квантового компьютера, который использует в качестве элементной базы упорядоченные массивы имплантированных доноров, снабженных электростатическими затворами, которые контролируют частоты оптических переходов, а также туннельные связи между донорами [A17, A18, A20]. Два донорных атома, один из которых предварительно ионизован, представляют его элементарную ячейку (кубит). Оптические нерезонансные импульсы, вызывающие рамановские переходы между логическими и возбужденными уровнями структуры, осуществляют однокубитные квантовые операции. Данный тип квантовой динамики используется также на промежуточных этапах выполнения двухкубитных операций или для транспортировки квантового бита в квантовом регистре. Для этого нами предусмотрена квазиодномерная

структура ВС, состоящая из ионизованных доноров и содержащая один пробный электрон, который может перемещаться по структуре под действием лазерных импульсов, рис. 7. Если пробный электрон перемещен на донор, находящийся вблизи какого-либо кубита, то вследствие кулоновского взаимодействия между ним и электроном кубита энергетические уровни и резонансные частоты электронных переходов последнего изменяются. Как следствие, в зависимости от наличия или отсутствия пробного электрона на ближайшем к данному кубиту вспомогательном доноре (ВД), возможны две конфигурации энергетических уровней кубита.

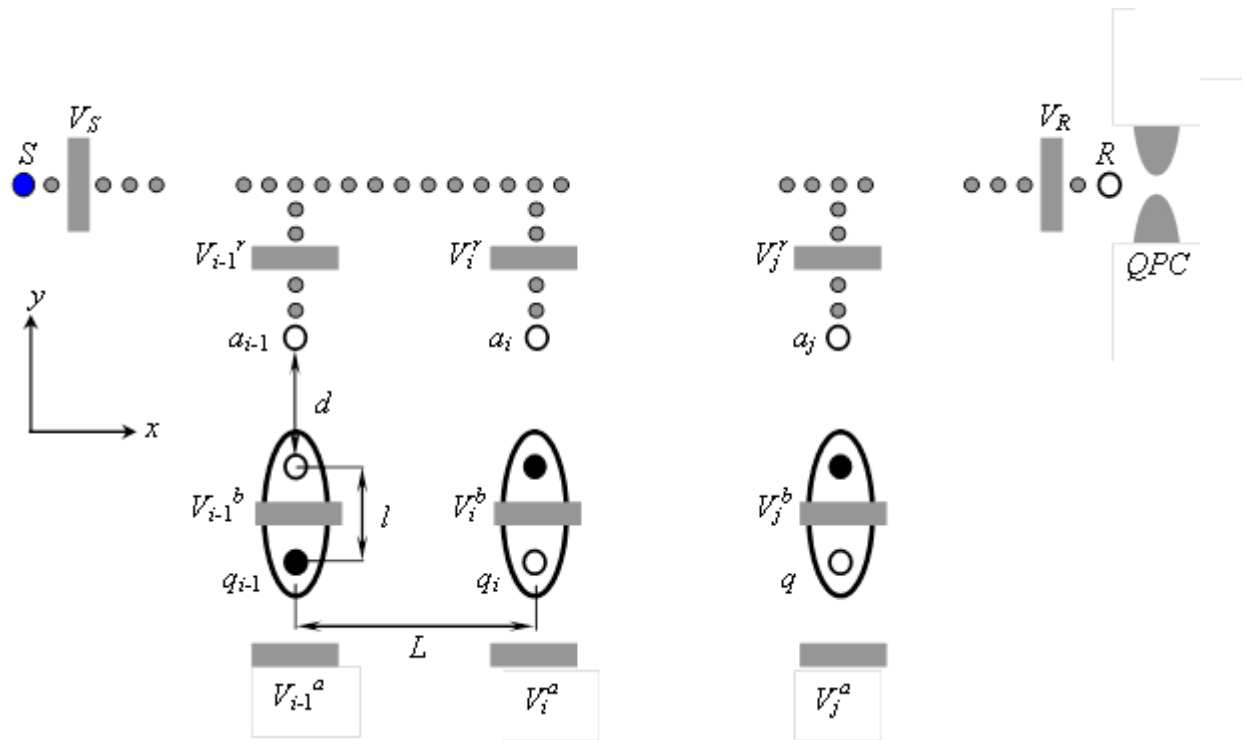


Рис. 7. Принципиальная схема полномасштабного квантового компьютера. Каждый кубит q_i , $i=1 - N$ снабжен вспомогательными затворами V_i^a , V_i^b и V_i^r . Закрашенный (пустой) кружок символизирует донор, содержащий (не содержащий) локализованный в основном состоянии электрон. Вспомогательная структура сформирована из квазилинейных цепочек ионизованных доноров, на концах которых находятся вспомогательные доноры S , R и a_i и содержит пробный электрон, локализованный в основном состоянии донора S . Совокупность затворов V_S , V_R и V_i^r используется для формирования эффективного оптико-туннельного канала, обеспечивающего косвенное взаимодействие выбранной пары произвольных кубитов. Квантовый точечный контакт QPC предназначен для измерения состояния нужного кубита по величине тока I_{QPC} через контакт. L – расстояние между кубитами, d – расстояние между кубитом q_i и вспомогательным донором a_i .

Поскольку лишь импульсы, находящиеся в двухфотонном резонансе со структурой, представляющей кубит, могут генерировать требуемые переходы, необходимая условность обеспечивается одной парой таких импульсов, частоты которых находятся в двухфотонном резонансе с частотами кубита в одной из двух конфигураций. В свою очередь, динамика пробного электрона также следует этому сценарию и зависит от того, в каком состоянии находится кубит. Электростатическое напряжение, подаваемое на затворы, размещенные на

диэлектрическом слое между данными ВД и остальной частью ВС, способствует формированию эффективного оптического контура, объединяющего два кубита. Используя такую схему, мы разработали метод реализации квантовых операций, необходимых для выполнения произвольного квантового алгоритма: однокубитных поворотов, нетривиальных двухкубитных операций, инициализации, измерения. Мы продемонстрировали, что, например, операция CZ требует четырехстадийного процесса, также как и измерение произвольного кубита. Заметим, что длительность двухкубитных операций в нашей схеме не зависит от расстояния между кубитами. Селективность воздействия внешних полей, необходимая для успешной реализации квантовых алгоритмов, достигается за счет а) надлежащего контроля частот, напряженностей и длительности импульсов; б) формировании надежного транспортного канала на основе вспомогательной структуры посредством электростатических затворов; в) подавлению паразитной динамики в тех частях квантового регистра и вспомогательной структуры которые не используются на данном этапе квантовых вычислений.

Глава 8. Квантовые вычисления на зарядовых кубитах на двойных квантовых точках в фотонных структурах.

Рассматривается схема квантового контроля и запутывания локализованных зарядовых состояний одиночного электрона в ДКТ, находящейся в полупроводниковом МР [A22, A24, A32]. В такой системе управление электронным состоянием ДКТ можно осуществить с помощью электростатического затвора, как с использованием лазера, так и без него. Как мы покажем, одиночный фотон в МР может управлять переходами электрона в ДКТ, обеспечивая таким образом однокубитные вращения (рис. 8). Более того, за счет обусловленного поглощения фотона МР первый (управляющий) кубит может блокировать эволюцию второго (управляемого) кубита. Этот эффект может быть использован для реализации нетривиальных двухкубитных операций, таких как CNOT. Энергия косвенного взаимодействия кубитов, обусловленного фотонами, не зависит от расстояния между кубитами. Позиционирование одного кубита на максимальном расстоянии от другого, в свою очередь, позволяет ослабить неконтролируемое паразитное влияние кубитов друг на друга. Инициализация состояния МР (заселение его одиночным фотоном) может быть достигнута путем электростатической инжекции одного электрона из подложки на возбужденный уровень КТ с его последующей релаксацией в основное состояние КТ с испусканием фотона в МР. Похожий механизм используется в каскадных лазерах на основе гетероструктур. Наконец, состояние кубита может измеряться с помощью зарядовых сенсоров с высокой чувствительностью к распределению электронной плотности в ДКТ или путем детектирования фотона, испущенного МР.

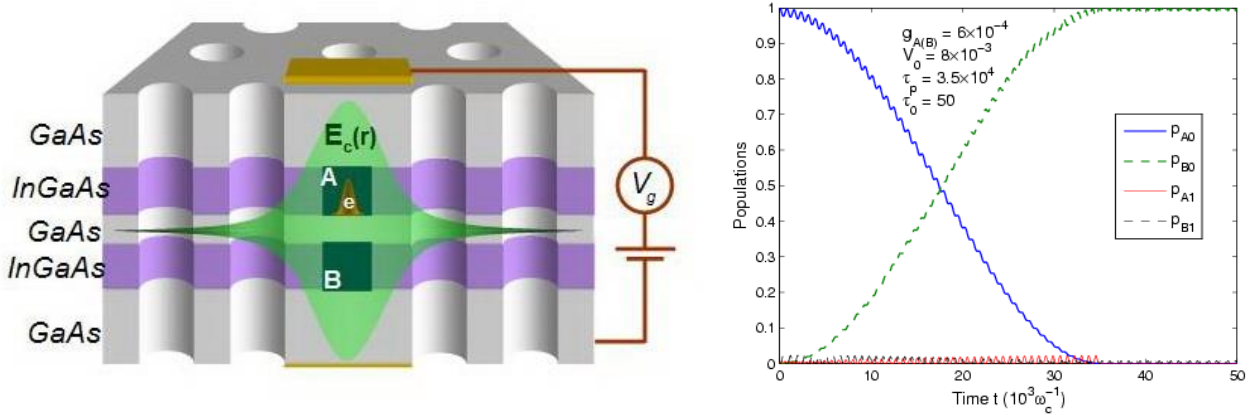


Рис. 8. Слева: схематическое изображение ДКТ, помещенной в пучность однофотонного поля $E_c(\mathbf{r})$ микрорезонатора. МР литографически сформирован в двумерном фотонном кристалле на основе InGaAs/GaAs гетероструктуры за счет отсутствия нескольких отверстий брэгговской решетки (линейный дефект). КТ А и В сформированы в слоях InGaAs, разделенных GaAs барьером. Электрон локализован в основном состоянии КТ А. Квантовое состояние структуры контролируется напряжением V_g на затворе. Справа: реализация квантовой операции NOT в нерезонансном режиме

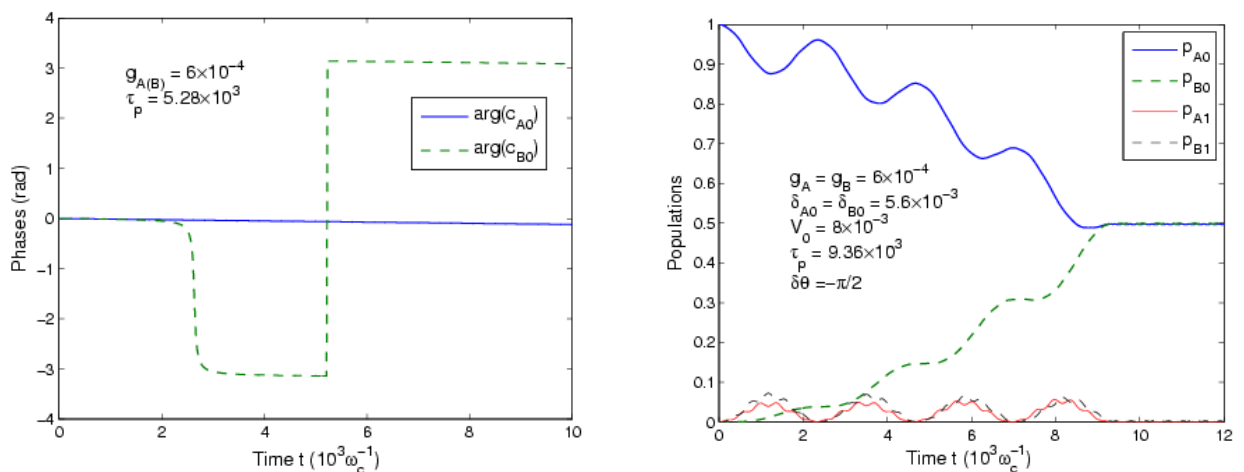


Рис. 9. Слева: резонансная эволюция фазы кубита, находящегося в равновзвешенной суперпозиции логических состояний. Небольшой наклон на графиках обусловлен медленным нерезонансным сдвигом. Справа: реализация вентиля Адамара, приводящая к формированию суперпозиции равновзвешенных логических состояний.

Операции (NOT, фазовый сдвиг и вентиль Адамара, рис. 9) формируют так называемый универсальный набор, позволяющий осуществить любое однокубитное вращение. Для выполнения же произвольной квантовой операции необходимо дополнить набор еще одной нетривиальной двухкубитной операцией, например, CNOT. Пусть основные состояния $|A0\rangle, |B0\rangle$ первой ДКТ представляют логические состояния управляющего кубита, в то время как основные состояния $|A0'\rangle, |B0'\rangle$ второй ДКТ будут являться логическими состояниями управляемого кубита, эволюция которого зависит от первой ДКТ. Предположим, что ДКТ

расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга, так что можно пренебречь прямым электрон-электронным взаимодействием. Двухкубитная система начинает свою эволюцию с произвольного состояния

$$|\Psi(0)\rangle = c_{A0,A0',1}|A0,A0',1\rangle + c_{A0,B0',1}|A0,B0',1\rangle + c_{B0,A0',1}|B0,A0',1\rangle + c_{B0,B0',1}|B0,B0',1\rangle.$$

Формально, присутствие ($n = 1$) или отсутствие ($n = 0$) фотона в МР означает включение или выключение управляющего поля для кубитов. Следовательно, если первый (управляющий) кубит в определенном логическом состоянии поглотил фотон из МР, изменяя значение $n = 1$ на $n = 0$, то МР не будет оказывать влияния на второй кубит. Это соображение можно применить для конструирования условных двухкубитных операций. Используя данный принцип, был разработан алгоритм операции CNOT с помощью двух ДКТ кубитов, взаимодействующих с одной и той же модой МР (рис. 10).

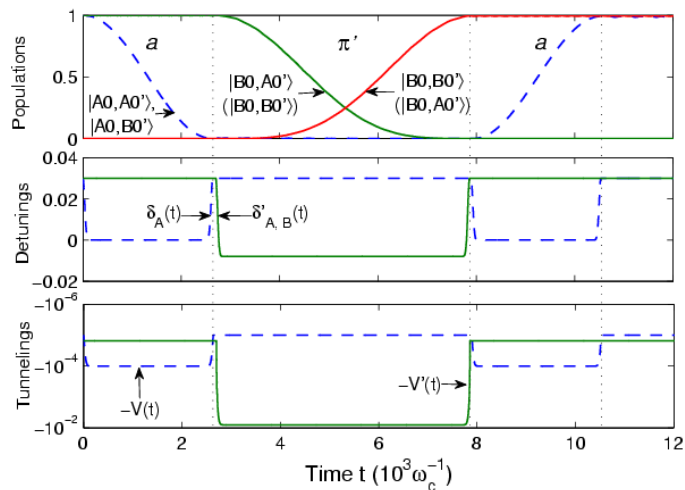


Рис. 10. Зависимость населенностей логических состояний, отстройки и туннелирования от времени для операции CNOT.

Масштабирование кубита означает создание упорядоченного массива ДКТ, где каждый кубит связан с пучностью моды МР и контролируется индивидуальным электрическим затвором. На рис. 11 схематично показана одна из возможных конструкций квантового регистра на основе ДКТ-кубитов. База регистра (то есть некоторое количество ДКТ, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга) может быть выращена на гетероструктуре InGaAs/GaAs. Затем на нее литографически наносится решетка фотонного кристалла, причем в областях, где расположена одиночная ДКТ (точечный дефект) и волновод (линейный дефект), отверстия не изготавливаются. Мы предполагаем, что величина взаимодействия дефекта-резонатора и волновода намного превосходит величину взаимодействия резонатора и ДКТ. Таким образом,

стационарная общая мода формируется за счет перескока фотонов между модами отдельных МР и волновода

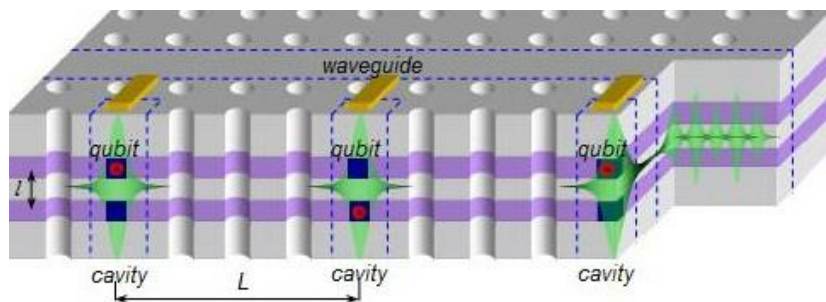


Рис. 11. Схема квантового регистра на основе ДКТ, помещенных в пучности мод индивидуальных резонаторов – дефектов фотонного кристалла, которые, в свою очередь, взаимодействуют между собой через общий волновод. Расстояние L между соседними кубитами существенно больше линейного размера l кубита.

Перечислим преимущества нашей модели по сравнению с альтернативными (в том числе «электростатическим» и «экситонным») вариантами.

1. В основу реализации многокубитных вентилях в нашей схеме положен принцип непрямого взаимодействия кубитов через вспомогательное состояние. В качестве такого состояния выбирается фоковское состояние МР или волновода на основе фотонной молекулы (ФМ), которое в одинаковой степени взаимодействует с каждым из КТ-кубитов. Данный принцип позволяет избежать трудностей, возникающих в схемах квантового компьютера с прямым (кулоновским) взаимодействием между кубитами. Перенос квантовой информации между КТ-кубитами, помещенными в высокодобротный оптический МР, осуществляется фотоном по общей моде МР (или ФМ), что позволяет выполнять не только одно- и двухкубитные операции, но и реализовывать многокубитные квантовые вентили различного типа между произвольными кубитами в регистре на расстояния порядка 1 см. Располагая кубиты достаточно далеко друг от друга, можно минимизировать их взаимное паразитное влияние.

2. Выбор основных состояний электрона КТ в качестве логических делает данный кубит устойчивым к электрон-фононной релаксации по сравнению с КТ-кубитами, в которых возбужденные состояния используются как логические. Реализация данного варианта КК основывается на использовании в качестве логических состояний орбитальных электронных состояний КТ, время потери когерентности которых составляет несколько десятков наносекунд. Экситонные состояния в КТ теряют свою когерентность за сотни пикосекунд.

3. Использование оптических средств управления состоянием кубита значительно упрощает дизайн и облегчает изготовление чипа, поскольку позволяет избежать необходимости

напыления большого количества затворов, которые также могли бы приводить к дополнительным шумам. Скорость выполнения элементарных квантовых операций на КТ-кубите с оптическим управлением составляет около 10 - 100 пс, в то время как время выполнения надежных операций на КТ-кубитах с электростатическим управлением составляет приблизительно 1 нс. Большой «арсенал» дизайнерских возможностей, который необходим при проектировании планарных квантовых структур на основе КТ и МР, обусловлен широким выбором форм и размеров КТ, а также возможностями интегрирования их в одномерные и двумерные оптические системы.

4. Структура фотонного чипа имеет большой потенциал для дальнейшего его совершенствования и подключения различных квантовых устройств для измерения, инициализации и диссипативной диагностики кубита.

5. Высокая степень интегрируемости электрон-фотонной квантовой структуры допускает использование других твердотельных наноструктур (оптоэлектромеханических, наноэлектромеханических, плазмонных систем) для дальнейшей оптимизации рабочих параметров кубита и чипа.

Глава 9. Моделирование спектроскопического отклика зарядового кубита в микрорезонаторе.

Динамический контроль плотности заряда в полупроводниковых КТ является неотъемлемой частью любой квантовой операции. В зависимости от параметров ДКТ и оптических полей эволюция электрона может проходить в двух режимах – когерентном (осцилляции Раби) и некогерентном (равновесное распределение электронной плотности). Для некоторых частных случаев возможно получение аналитического решения динамических уравнений в том или ином приближении. В общем же случае характерные частоты ДКТ, на которых наблюдается нетривиальная одноэлектронная динамика, выявляются с помощью спектроскопического моделирования в установившемся режиме. В качестве инструмента для анализа поведения системы обычно используется стандартный подход, базирующийся на решении уравнения Линдблада для матрицы плотности электрон-фотонной системы с учетом ухода фотонов из МР в континуум и релаксации возбужденного электрона с испусканием фотона или фонона. Следуя общепринятому алгоритму, мы в данной главе моделируем и анализируем спектроскопический отклик одноэлектронного ДКТ-кубита, взаимодействующего с квантовым полем высокочастотного МР и слабым пробным лазерным импульсом [A30, A31, A33, A35]. Результаты спектроскопических исследований могут быть использованы при реализации однокубитных вентилях, создании статистической смеси локализованных состояний ДКТ, переносе электрона между локализованными состояниями ДКТ, конверсии фотонов лазерного

многофотонного поля в однофотонные состояния МР. Учет диссипативных эффектов, возникающих в системе, производится в рамках формализма Линдблада. Для описания некогерентной динамики вводится несколько диссипативных каналов, характеризующих неидеальность МР, спонтанные переходы между уровнями КТ, дефазировку и электрон-фононную релаксацию.

Мы приводим на рис. 12 графические результаты численного моделирования спектроскопического отклика системы при варьировании ряда параметров (энергии туннелирования, частоты возбуждения одной из КТ, частоты лазера и частоты МР) в установившемся режиме. Отметим наглядную демонстрацию перехода от квантового (субфотонного) режима с дублетом Джейнса-Каммингса в полуклассический режим (правая панель на рис. 12) с увеличением амплитуды лазерного поля. При этом происходит «размывание» дублета, указывающее на нарушение условий фотонной блокады, которое связано с многофотонным заселением МР.

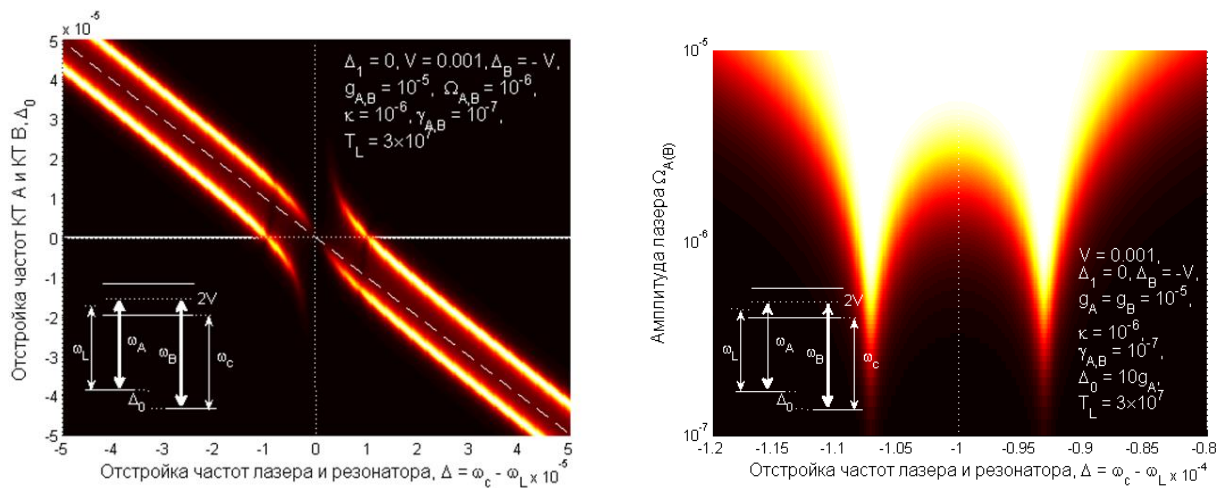


Рис. 12. Слева: контурный график функции P_{exc} в координатах отстроек Δ и Δ_0 в установившемся резонансном однофотонном режиме. Схема уровней ДКТ показана в левом нижнем углу. Параметры ДКТ и полей приведены в правом верхнем углу. Диагональная пунктирная линия $\Delta_0 = -\Delta$ соответствует условию строгого резонанса в обеих КТ. Справа: контурный график функции P_{exc} в координатах отстройка-амплитуда (Δ и $\Omega_{A(B)}$) в установившемся резонансном однофотонном режиме. Фиксированное значение $\Delta_0 = 10g_B$ соответствует асимметричной ДКТ. Вертикальная линия $\Delta = -\Delta_0$ обозначает положение строгого резонанса для данной конфигурации.

Данный подход также можно применять и для нахождения неизвестных параметров уже изготовленной структуры путем анализа экспериментально полученных спектроскопических данных и сопоставления их с результатами расчетов, сделанных для некоторого пробного набора модельных параметров. Это позволит в конечном итоге определить фактические параметры с помощью процедуры подгонки.

Глава 10. Квантовая память на двойной квантовой точке в микрорезонаторе.

Помимо реализации квантовых алгоритмов, хранение результатов промежуточных вычислений, то есть создание квантовой памяти, также представляет собой серьезную задачу. Как правило, квантовые операции выполняются на физических носителях, характеризующихся малыми временами когерентности. Это связано с выбором логического базиса, когда для кодировки нуля и единицы используются основное и возбужденное состояния носителя – атома, иона в ловушке, КТ и т.д. Если основное состояние является долгоживущим, то возбужденное состояние подвержено быстрому распаду (спонтанной эмиссии фотона или безызлучательной фононной релаксации). Тем не менее, можно подобрать такую систему, в которой оба логических состояния являются основными и, следовательно, устойчивыми к процессам потери когерентности. Полупроводниковая ДКТ, состоящая из двух КТ и содержащая один электрон, удовлетворяет данному условию. Подобная система, не подверженная процессам электронной релаксации, может использоваться в качестве элемента квантовой памяти. Для его интеграции в квантовую сеть необходимо разработать механизм обмена состояниями между ним и транспортным кубитом (фотоном с телекоммуникационной длиной волны около 1550 нм), чтобы перенести (записать) состояние, представляющее результат квантового вычисления, в кубит памяти.

В данной главе предлагается схема устройства (узла квантовой памяти), состоящего из полупроводникового высокодобротного микрорезонатора (МР), внутри которого размещены одиночная КТ-конвертор (ОКТ) и ДКТ – кубит памяти [А36, А37]. ОКТ играет роль «приемника» для транспортного кубита-фотона и его промежуточной записи в экситонное состояние. Затем это состояние путем частотной конверсии, в которой участвуют МР, ОКТ, ДКТ и лазер, преобразуется в состояние зарядового кубита памяти, рис. 13. Результаты моделирования указывают на возможность загрузки кубита памяти с большой вероятностью несколькими способами в зависимости от того, какой из каналов диссипации (фотонная или электронная релаксация) является доминирующим. Главной трудностью на пути реализации рассмотренного алгоритма записи остается недостаточно высокая добротность существующих оптических резонаторов.

В ходе моделирования процесса записи с помощью численного решения уравнения Линдблада для матрицы плотности получена вероятность частотной конверсии фотона с учетом диссипативных процессов в резонансном и нерезонансном режимах, найдены условия и время полной конверсии. В нашей структуре КТ расположены в квазидвумерной пластинке, свойствами фононного спектра которой можно управлять, регулируя таким образом и скорость безызлучательной релаксации за счет определенного выбора толщины пластинки и

местоположения КТ. Данная скорость может быть уменьшена на несколько порядков по сравнению с трехмерным случаем. Кроме того, присутствие МР модифицирует фотонный континуум (эффект Перселла), что позволяет уменьшить и скорость спонтанной эмиссии в КТ, если частота перехода и частота МР значительно отличаются друг от друга. Показано, что наиболее практичным способом конвертирования телекоммуникационного фотона в фотон МР является разделение данной процедуры на два этапа. Исследован процесс записи фотонного состояния в кубит памяти на основе одноэлектронной ДКТ. Установлено, что для успешной реализации алгоритма загрузки кубита памяти необходимо, чтобы частоты Раби (скорости когерентных процессов) заметно превосходили скорости релаксации. Это может быть достигнуто за счет структурной инженерии, модифицирующей фотонный и фононный резервуары. Расчеты, проведенные для их «оптимистических» оценок, указывают на возможность реализовать предлагаемый сценарий, используя существующие на сегодняшний день элементы узла, с вероятностью более 90%.

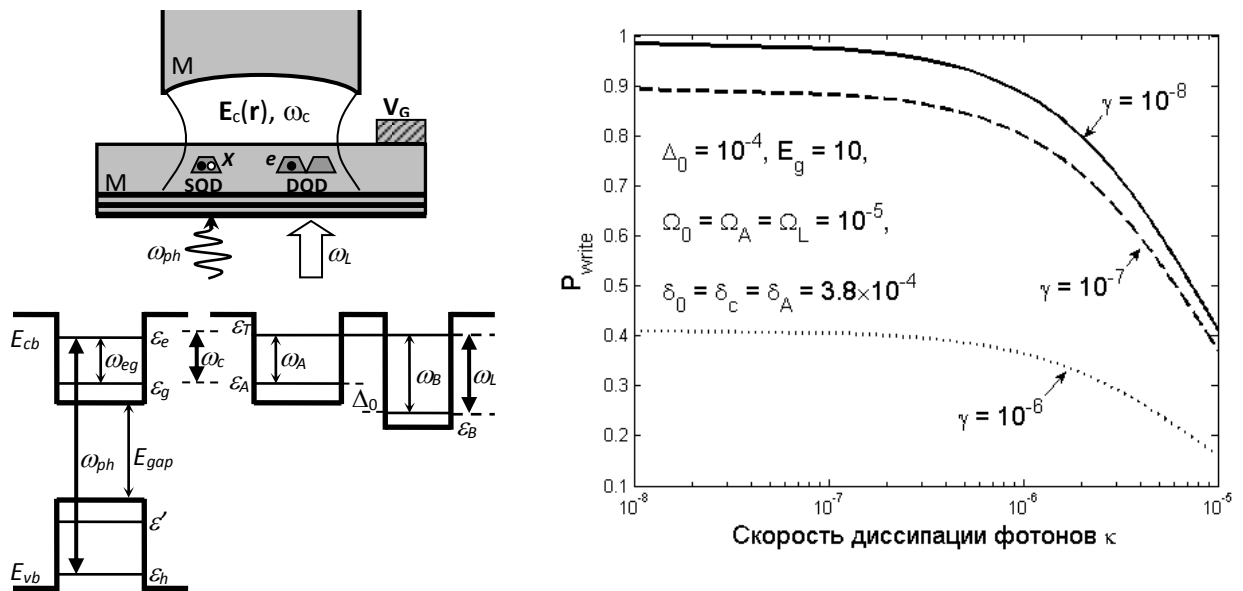


Рис. 13. Слева: вариант реализации узла квантовой памяти с открытым микрорезонатором Фабри-Перо, образованным вогнутым зеркалом M_1 и плоским многослойным зеркалом M_2 . Полупроводниковая пластинка, содержащая ОКТ и ДКТ, находится в пучности поля $E_c(\mathbf{r})$ основной гауссовой ТЕМ-моды МР с частотой ω_c . Электростатическое поле затвора V_G регулирует частоты электронных и экситонных переходов, а частота МР настраивается путем изменения расстояния между зеркалами. Телекоммуникационный фотон поглощается с образованием экситона в ОКТ, а лазер генерирует электронный переход в ДКТ. Показаны зонные диаграммы ОКТ и ДКТ. E_{cb} и E_{vb} – энергии дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, соответственно, E_{gap} – ширина запрещенной зоны в области ОКТ. Показаны энергии состояний, использующихся в алгоритме записи. Переходы, реализующие схему записи, обозначены жирными стрелками. Справа: графики зависимостей вероятности записи P_{write} от скорости κ фотонной диссипации для нескольких значений скорости γ релаксации в ОКТ и ДКТ в резонансном режиме управления процессом конверсии.

Основные результаты и выводы

По масштабируемой схеме квантового регистра с лазерным и электрическим управлением с ВС на основе одноэлектронной сети (Главы 2 – 7):

1. Теоретически подтверждена возможность использования одноэлектронной симметричной ДКТ в качестве квантового бита с управлением при помощи внешних электрических полей (как сильных квазистатических, так и слабых переменных), прикладываемых к затворам. Найдены аналитические выражения для матриц операторов, соответствующих основным одно- и двухкубитным квантовым вентилям, указаны критерии оптимизации точности воспроизведения квантовых операций, описаны несколько вариантов реализации нетривиальных квантовых операций, базирующихся на разных способах выбора логических состояний двух кубитов.
2. Теоретически изучено влияние резонансного лазерного импульса на квантовую динамику электрона в ДКТ. С учетом возможного различия размеров квантовых точек найдены значения частоты, амплитуды и длительности импульса, при которых вероятность резонансного перехода электрона из основного состояния одной КТ в основное состояние другой КТ (однокубитный вентиль NOT) является максимальной.
3. Разработаны оригинальные, оптимизированные по количеству шагов алгоритмы реализации двух- и многокубитных квантовых операций, а также запутывания зарядовых ОКТ и ДКТ кубитов. Предложена схема помехоустойчивого хранения квантовой информации для прототипа квантового регистра из девяти кубитов (код Шора).
4. Разработана теоретическая модель архитектуры масштабируемого квантового регистра с ВС на основе планарной структуры из КТ или донорных атомов в полупроводнике. Управление состоянием регистра осуществляется оптическими и электростатическими импульсами с целью управления эволюцией вектора состояния электрона. Разработан общий подход к реализации одно- и двухкубитных операций, необходимых для построения произвольного квантового вентиля.

По масштабируемой схеме квантового регистра с квантовооптическим и электрическим управлением с ВС на основе однофотонной сети (Главы 8 – 10):

1. Теоретически подтверждена возможность построения полномасштабного твердотельного квантового компьютера на основе КТ и их ансамблей, находящихся в высокодобротных оптических МР и квантовых сетях на их основе. Исследована возможность выполнения одно- и двухкубитных операций на зарядовых ДКТ

- кубитах, когерентно взаимодействующих с ВС (квантовая мода МР или волновода), разработаны несколько способов управления их состояниями и различные варианты реализации нетривиальных двухкубитных вентилей, а также генерации запутанных многокубитных состояний Шора, рассчитано время выполнения данных вентилей с учетом фотонной диссипации и электронной релаксации.
2. Проведено численное моделирование квантовой динамики запутанных состояний одной или нескольких КТ, помещенных в МР, в рабиевском и рамановском режимах в рамках подходов Шредингера и Линдблада. Проанализировано влияние диссипативных эффектов, выполнен расчет времен и точности выполнения одно-, двух- и трехкубитных квантовых операций на КТ.
 3. Предложен новый способ записи квантового состояния транспортного кубита (фотона с телекоммуникационной длиной волны) в ячейку (узел) квантовой памяти на основе одноэлектронной полупроводниковой асимметричной ДКТ. Вспомогательный интерфейс узла представлен МР, частотным ОКТ-конвертором и лазером.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

- A1. Tsukanov A.V. Single electron transfer between ground-states of multidot structure // Quantum computers & Computing. 2002. V.3, PP. 92 - 100.
- A2. Tsukanov A.V., Larionov A.A., and Valiev K.A. Resonant-tunneling solid state NMR quantum computer // Proc. of SPIE. 2003. V. 5128. PP. 131-139.
- A3. Цуканов А.В. и Опенев Л.А. Резонансные переходы электрона между полупроводниковыми квантовыми точками под действием лазерного излучения // ФТП. 2004. Т. 38. С. 94-101. [Semiconductors. 2004. V. 38. P. 91.]
- A4. Openov L.A. and Tsukanov A.V. Charge qubit rotations in a double-dot structure // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80. С. 572-575. [JETP Lett. 2004. V. 80. P. 503]; // LANL E-print. 2004. arXiv: cond-mat/0411010.
- A5. Цуканов А.В. Резонансные переходы электрона между тремя полупроводниковыми квантовыми точками под действием лазерного излучения // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1382-1365. [Semiconductors. 2004. V. 38. P. 1340.]
- A6. Tsukanov A.V. and Openov L.A. Selective electron transfer between the quantum dots under the resonant pulse // Proc. of SPIE. 2005. V. 5833. P. 137; // LANL E-print. 2004. arXiv: cond-mat/0411083.

- A7. Tsukanov A.V. Entanglement and quantum state engineering in the optically driven two-electron double-dot structure // Phys. Rev. A. 2005. V. 72. P. 022344; // LANL E-print. 2004. arXiv: cond-mat/0412653.
- A8. Опенев Л.А. и Цуканов А.В. Селективный перенос электрона между квантовыми точками под действием резонансного импульса // ФТП. 2005. Т. 39. С. 251-257, 2005. [Semiconductors. 2005. V. 39. PP. 235–242.]
- A9. Цуканов А.В. Оптическое управление орбитальными и спиновыми состояниями электронов в квантовых точках // Исследования по проблеме создания квантовых компьютеров. М.: Наука. 2005. С. 37-48 (Тр. ФТИАН; Т.18).
- A10. Tsukanov A.V. Rabi oscillations in the four-level double-dot structure under the influence of the resonant pulse // Phys. Rev. B. 2006. V. 73. P. 085308; // LANL E-print. 2006. arXiv: cond-mat/0601606.
- A11. Цуканов А.В. и Валиев К.А. Идеальные и неидеальные квантовые операции на зарядовом кубите // Микроэлектроника. 2006. Т. 36. С. 83. [Russian Microelectronics. 2006. V. 36. P. 67].
- A12. Tsukanov A.V. Single-qubit operations in the double-donor structure driven by optical and voltage pulses // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 035328.
- A13. Tsukanov A.V. Quantum operations in the optically driven two-electron double-dot structure // Proc. of SPIE. 2006. V. 6264. P. 62640J.
- A14. Цуканов А.В. Зарядовый кубит на основе одноэлектронной донорной пары с оптическим и электростатическим управлением // Исследования по проблеме создания квантовых компьютеров. М.: Наука. 2008. С. 7-22 (Тр. ФТИАН; Т.19).
- A15. Tsukanov A.V. Resonant optical electron transfer in one-dimensional multiwell structures // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. V. 20. P. 315204.
- A16. Tsukanov A.V. Optically driven nanostructures as the basis for large-scale quantum computing // Proc. of SPIE. 2008. V. 7023. P. 70230M.
- A17. Tsukanov A.V. Charge qubit entanglement via conditional single-electron transfer in an array of quantum dots // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. V. 21. P. 055501.
- A18. Tsukanov A.V. Controlled-phase operation on two remote charge qubits via conditional electron dynamics in auxiliary structure // Optics Communications. 2009. V. 282. P. 4175.
- A19. Цуканов А.В. Резонансный перенос электрона в одномерных многоямных структурах // Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование. М.: Наука. 2009. С. 35-56 (Тр. ФТИАН; Т.20).

- A20. Tsukanov A.V. Indirect coupling in a cluster of quantum-dot-based charge qubits // Journ. Comp. Theor. Nanosci., A Special Issue on Technology Trends and Theory of Nanoscale Devices for Quantum Applications. 2010. V. 7. P. 1727.
- A21. Tsukanov A.V. Quantum information transfer protocol via optimized single-electron // Quantum computers & Computing. 2010. V. 10. P. 3.
- A22. Tsukanov A.V. Photon-assisted conditionality for double-dot charge qubits in a single-mode cavity // Phys. Rev. A. 2012. V. 85. P. 012331.
- A23. Цуканов А.В. Твердотельные зарядовые кубиты на одиночных и двойных квантовых точках // Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование. М.: Наука. 2013. С. 56 (Тр. ФТИАН; Т.23).
- A24. Цуканов А.В. и Катеев И.Ю. Квантовые операции на зарядовых кубитах с электростатическим управлением в полупроводниковых резонаторах // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. С. 246.
- A25. Цуканов А.В. Квантовые точки в фотонных молекулах и квантовая информатика. Часть I // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. С. 403.
- A26. Цуканов А.В. Квантовые точки в фотонных молекулах и квантовая информатика. Часть II // Микроэлектроника. 2014. Т.43. С. 163.
- A27. Цуканов А.В. и Катеев И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть I. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. С. 323.
- A28. Цуканов А.В. и Катеев И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть II. // Микроэлектроника. 2014. Т. 43. С. 403.
- A29. Цуканов А.В. и Катеев И.Ю. Квантовые вычисления на квантовых точках в полупроводниковых микрорезонаторах. Часть III. // Микроэлектроника. 2015. Т. 44. С. 79.
- A30. Цуканов А.В., Чекмачев В.Г. Моделирование спектроскопического отклика кубита на двойной квантовой точке с учетом диссипативных процессов // Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование. М.: Наука. 2016. СС. 58-77 (Тр. ФТИАН; Т.25).
- A31. Цуканов А.В., Чекмачев В.Г. Моделирование спектроскопического отклика и динамики электрона в двойной квантовой точке // Микроэлектроника. 2016. Т. 45. № 1. С. 3.
- A32. Tsukanov A.V. Multifunctional quantum node based on double quantum dot in laser and cavity fields // Proc. of SPIE. 2016. V. 10224. P. 102242G.

- A33. Tsukanov A.V. and Chekmachev V.G. Stark-shift based quantum dot-cavity electrometer // Proc. of SPIE. 2016. V. 10224. P. 102242I.
- A34. Цуканов А.В. Зарядовые кубиты на полупроводниковых квантовых точках в механических резонаторах: управление фононными процессами // Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование. М.: Наука. 2017. СС. 30-54 (Тр. ФТИАН; Т.26).
- A35. Цуканов А.В., Чекмачев В.Г. Сенсор электрического поля на основе двойной квантовой точки в микрорезонаторе // ФТП. 2017. Т. 51. С. 1249-1256.
- A36. Цуканов А.В. Квантовая память на зарядовом кубите в оптическом микрорезонаторе // Опт. и спектроск. 2017. Т. 123. СС. 100-108.
- A37. Цуканов А.В., Катеев И.Ю. Квантовый узел памяти на основе полупроводниковой двойной квантовой точки в оптическом резонаторе с лазерным управлением // Квант. электроника. 2017. Т. 47. СС. 748–756.

Цитируемая литература

1. Joyce B.A., Kelires P.C., Naumovets A.G., and Vvedensky D.D. Quantum Dots: Fundamentals, Applications, and Frontiers (NATO Science Series, 2003).
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. 2-е изд. М. – Ижевск: НИЦ РХД, 2002. 360 с.
3. Vahala K.J. Optical microcavities // Nature. 2003. V. 424. P. 839.
4. Hayashi T., Fujisawa T., Cheong H.D., Jeong Y.H., Hirayama Y. Coherent Manipulation of Electronic States in a Double Quantum Dot // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91. P. 226804. 4 p.
5. Burkard G., Loss D., and DiVincenzo D.P. Coupled quantum dots as quantum gates // Phys. Rev. B. V. 59. P. 2070.
6. Lu X.-Y., Wu J., Zheng L.-L., and Zhan Z.-M. Voltage-controlled entanglement and quantum-information transfer between spatially separated quantum-dot molecules // Phys. Rev. A. 2011. V. 83. P. 042302.
7. Gallo P., Felici M., Dwir B., Atlasov K.A., Karlsson K.F., Rudra A., Mohan A., Biasiol G., Sorba L., and Kapon E. Integration of site-controlled pyramidal quantum dots and photonic crystal membrane cavities // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 263101.
8. Schneider C., Heindel T., Huggenberger A., Weinmann P., Kistner C., Kamp M., Reitzenstein S., Höfiling S., and Forchel A. Single photon emission from a site-controlled quantum dot-micropillar cavity system // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 111111.

9. Xie Z.G. and Solomon G.S. Spatial ordering of quantum dots in microdisks // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 093106.
10. Kim H., Thon S.M., Petroff P.M., and Bouwmeester D. Independent tuning of quantum dots in a photonic crystal cavity // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 243107.
11. Fedichkin L., Yanchenko M., Valiev K.A. Coherent charge qubit based on GaAs quantum dots with a built-in barrier // Nanotechnology. 2000. Vol. 11. P. 387 – 391.
12. Hu X., Koiller B., Das Sarma S. Charge qubits in semiconductor quantum computer architecture: Tunnel coupling and decoherence // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 71. P. 235332. 9 p.