

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Физико-технологического института РАН
член-корр. РАН В.Ф. Лукичев

член-корр. РАН В.Ф. Лукичев

«07» сентября 2017 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по докторской диссертации Цуканова Александра Викторовича

«Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях», выполненной в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологическом институте Российской академии наук (ФТИАН РАН).

ВЫПИСКА

из протокола № 06/17 от 07 сентября 2017 г. заседания научного семинара «Квантовые компьютеры» в Физико-технологическом институте РАН

ПРИСУТСТВОВАЛИ: В работе семинара под председательством г.н.с., д.ф.-м.н. Ю.И. Богданова приняли участие 12 человек: директор ФТИАН, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. В.Ф. Лукичев, ученый секретарь Института, к.т.н. В.А. Кальнов; ученый секретарь диссертационного совета, в.н.с., к.ф.-м.н. В.В. Вьюрков; г.н.с., д.ф.-м.н. К.В. Руденко; г.н.с., д.ф.-м.н. М.А. Чуев; в.н.с., к.ф.-м.н. В.П. Кудря; с.н.с., к.ф.-м.н. И.Ю. Катеев; с.н.с., к.ф.-м.н. И.А. Семенихин, н.с., к.ф.-м.н. А.В. Мяконьких, н.с., к.ф.-м.н. А.Е. Рогожин; м.н.с. В.Г. Чекмачев, инженер М.С. Рогачев

СЛУШАЛИ: Доклад по диссертационной работе Цуканова Александра Викторовича «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

В ходе обсуждения директор ФТИАН д.ф.-м.н. В.Ф. Лукичев, являющийся научным консультантом Цуканова А.В., сообщил, что во время работы над диссертацией соискатель проявил себя как специалист, владеющий глубокими теоретическими знаниями и необходимым практическим опытом, умеющий формулировать и решать задачи повышенной сложности. Было отмечено, что диссертант на высоком профессиональном уровне владеет различными методами исследований (обзорный анализ литературы, получение аналитических результатов, численное моделирование). Цуканов А.В. выполнил задачи, раскрывающие заявленную тему диссертационной работы, самостоятельно. Опубликованные соискателем в отечественных и зарубежных научных периодических изданиях работы целиком отражают содержание диссертации. По мнению В.Ф. Лукичева, работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, и ее следует рекомендовать к защите в Физико-технологическом институте РАН.

Зав. лабораторией ФКК, д.ф.-м.н. Ю.И. Богданов в своем выступлении указал на актуальность выполненной работы и практическую значимость полученных результатов,

связанных с анализом и улучшением существующих и разработкой новых схем полномасштабных квантовых вычислительных устройств.

С положительной оценкой работы также выступили:

- г.н.с., д.ф.-м.н. М.А. Чуев;

- в.н.с., к.ф.-м.н. В.П. Кудря;

ПОСТАНОВИЛИ: рекомендовать диссертацию Цуканова Александра Викторовича «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» и утвердить заключение, содержащее общую характеристику диссертационной работы.

Актуальность темы

Полупроводниковые квантовые точки (КТ), часто называемые искусственными атомами, привлекают внимание многих исследователей уже в течение почти двадцати лет. 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. 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 достаточно 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). 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.

Научная новизна и достоверность полученных результатов

Научная новизна работы состоит в следующих результатах, которые были получены впервые:

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, обусловленном 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 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 вентилях CNOT и CZ, а также генерации запутанных многокубитных состояний Шора, рассчитано время

выполнения данных вентилях 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.

Достоверность и высокое качество полученных результатов подтверждаются 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.

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 (одnofотонного) 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 вентилях 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.

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.

Личный вклад автора

А.В. Цукановым 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.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.27.01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Полнота изложения материалов в печати

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. 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.

Заключение

Научный семинар «Квантовые компьютеры» в Физико-технологическом институте РАН после обсуждения диссертационной работы Цуканова А.В. оценивает ее как научную квалификационную работу, которая по актуальности, объему, новизне и значимости результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

Исходя из вышесказанного, следует рекомендовать диссертацию Цуканова А.В. «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в диссертационном совете Д.002.204.01 в Физико-технологическом институте РАН по специальности 05.27.01 - Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро - и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Руководитель семинара
«Квантовые компьютеры»
г.н.с., д.ф.-м.н., профессор



Ю.И. Богданов