

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Цуканова Александра Викторовича «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, по специальности: 05.27.01 - «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Актуальность диссертации

Диссертационная работа Цуканова Александра Викторовича базируется на результатах, полученных им в период с 2002 по 2017 годы. В основе моделей квантового компьютера, рассмотренных в работе, лежат полупроводниковые квантовые точки (КТ). В отличие от существующих вариантов реализации квантовых битов и регистров на КТ, которые используют либо экситонные, либо спиновые степени свободы КТ, автором был выбран вариант так называемого «зарядового» кубита. Он предполагает кодировку квантовой информации в электронные степени свободы КТ. Такой выбор обуславливает высокую надежность обработки и хранения информации при достаточной глубине удерживающего потенциала КТ. Электрон, локализованный в ее основном состоянии, может находиться в КТ неограниченно долго. Для управления состоянием КТ (то есть, для реализации квантовых вентилей) автор рассматривает оптическое воздействие на электрон полуклассическим полем лазера или квантовым полем микрорезонатора. Электрические поля металлических затворов также привлекаются для юстировки энергетических уровней зарядового кубита. В работе рассмотрены различные типы зарядовых кубитов, состоящие из одиночных, двойных и тройных КТ. Каждый из них обладает своими особенностями и может быть использован в качестве структурной ячейки полномасштабного устройства.

Главными препятствиями на пути создания полномасштабного квантового компьютера на базе КТ являются сложность высокоточного позиционирования отдельных КТ в полупроводниковой матрице, проблема синтеза КТ заданных размеров и формы, необходимость оптимальной ориентации КТ относительно управляющих устройств, а также трудности, связанные с манипуляциями отдельными электронами (экситонами, электронными спинами) и организацией взаимодействия между ними. Анализ и решение данных проблем неразрывно связаны с математическим моделированием структурных и динамических свойств физических носителей квантовых битов (в данном случае – электронов в КТ) с учетом технологических флуктуаций, внешних шумов и других источников потери когерентности. Поэтому тема и цели диссертационной работы - разработка полупроводниковой структуры (квантового регистра) на основе

одноэлектронных КТ с лазерным и электростатическим управлением для помехоустойчивого кодирования, обработки, транспортировки и хранения квантовой информации, а также исследование возможности построения полномасштабного твердотельного квантового компьютера на основе КТ и их ансамблей, находящихся в высокодобротных оптических МР и квантовых сетях на их основе - представляются чрезвычайно актуальными как в научном, так и в практическом плане.

Анализ и оценка содержания диссертации

Диссертация Цуканова А.В. изложена на 371 странице и состоит из введения, десяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Такой формат был выбран автором для удобства работы с изложенным материалом. Фактически, диссертация представляет собой монографию, написанную в стиле «handbook».

В **главе 1** подробно проанализировано состояние теории и эксперимента, касающихся использования полупроводниковых КТ в квантовой информатике. Данный обзор обосновывает направление исследований по теме диссертации.

Глава 2 продолжает исследования когерентной динамики зарядового ДКТ кубита с электростатическим управлением, начатые во ФТИАНе в 2000 г. под руководством акад. Валиева К.А. – основоположника квантового компьютеринга в России. Автором в данном направлении были получены оригинальные результаты: аналитические выражения для операторов эволюции одного и двух кубитов во внешнем медленно меняющемся электрическом поле затворов, указаны параметры структуры и поля, соответствующие основным одно- и двукубитным операциям при наличии паразитной динамики. Выявлены основные закономерности эволюции электронов в полупроводниковых ДКТ - зарядовых кубитах - под действием переменных внешних полей и рассмотрены различные способы кодировки квантовой информации.

В **главе 3** автором теоретически исследована квантовая динамика электрона при воздействии лазерного импульса на наноструктуру, состоящую из двух туннельно-связанных КТ. С учетом возможного различия размеров КТ получено аналитическое выражение для вероятности индуцированного перехода электрона между состояниями, локализованными в разных КТ. С помощью наглядной и простой модели был рассмотрен метод построения решений для четырехуровневой ДКТ системы (прототипа зарядового кубита) во внешних полях общего вида (лазерном в резонансном и рамановском режимах и электростатическом). При этом полученный результат обобщает сразу несколько возможных вариантов реализации кубита (на одиночной КТ или ДКТ) благодаря выбору параметров структуры и поля. Аналитически рассчитана поправка к RWA-решению и оценена ошибка, связанная с использованием этого распространенного приближения.

В главе 4 было теоретически изучено влияние резонансного электромагнитного импульса на когерентную динамику двух электронов в системе двух туннельно-связанных квантовых точек. Продемонстрирована возможность селективного переноса электрона между этими квантовыми точками. Найдено выражение для вероятности переноса как функции параметров квантовых точек и электромагнитного импульса. Показано, что эта вероятность может быть близка к единице. Предложена схема генерации запутанного состояния электронных спинов при помощи обменного взаимодействия, включаемого/выключаемого оптически.

В главе 5 рассмотрены одноэлектронные модели а) квазилинейной и б) кольцевой наноструктур на основе туннельно-связанных КТ и изучен эффект селективного резонансного переноса электрона между двумя выбранными КТ под действием лазерного импульса. Помимо широкого интереса к фундаментальному вопросу о возможности надежного контроля над динамикой носителей заряда в низкоразмерных системах, эта задача имеет и прямое практическое применение – организацию непрямого взаимодействия в упорядоченных массивах квантовых битов, опосредованного вспомогательной системой – полупроводниковой наноструктурой, содержащей пробный электрон. Предложен алгоритм реализации операции «controlled-phase» на двух зарядовых кубитах. Эволюция пробного электрона включает несколько оптических переносов между локализованными состояниями структуры и приводит к накоплению специфических фазовых множителей для каждого из четырех базисных состояний двух кубитов. Таким образом, в данной схеме операции непосредственно с кубитами заменяются управлением состоянием вспомогательной структуры.

В главе 6 автор предложил способ реализации условных квантовых операций с участием двух, трех и девяти зарядовых кубитов с использованием вспомогательной структуры на основе полупроводниковых КТ. Гибридизированные состояния данной структуры служат в качестве сенсорных состояний, чьи энергии и волновые функции зависят от орбитальных состояний КТ, представляющих кубиты. В частности, влияние состояния трехкубитного кластера на спектральные свойства структуры проявляется в сдвигах частот оптических переходов между одноэлектронными уровнями структуры. Параметры структуры должны быть выбраны таким образом, чтобы различные зарядовые конфигурации кластера соответствовали различным частотным сдвигам. Как было показано, применение двух последовательных $\pi/2$ -импульсов, частота которых равна резонансной частоте данного перехода, к структуре, находящейся в основном состоянии, приводит к определенному фазовому сдвигу этого состояния. Фазовый сдвиг зависит от состояния кластера и может быть ассоциирован с нетривиальной эволюцией трехкубитного состояния.

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 Тоффли может быть реализован посредством десяти элементарных однокубитных вентилях и шести двухкубитных вентилях CNOT. В оригинальной схеме, разработанной автором, данный вентиль требует только четыре операции, а именно, два вентиля Адамара и два $\pi/2$ -инверсионных перехода. Таким образом, предложенный им 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.

В главе 7 автор описал основные принципы, лежащие в основе предложенного им варианта квантового вычислительного устройства, использующего в качестве кубитов и вспомогательной структуры имплантированные в полупроводник доноры (или КТ). В отличие от уже рассмотренных схем с электростатическим контролем, его стратегия управления кубитами базируется на использовании оптических импульсов, индуцирующих рамановские переходы между логическими состояниями. Селективность воздействия внешних полей, необходимая для успешной реализации квантовых алгоритмов, достигается за счет а) надлежащего контроля частот, напряженностей и длительности импульсов; б) формировании надежного транспортногo 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.

В главе 8 автором рассмотрены одно- и двухкубитные операции на зарядовых ДКТ кубитах, сформированных внутри высокочастотного полупроводникового микрорезонатора (МР) (дефекта ФК, диска, тороида или сферы) в пучностях одной из его собственных оптических мод, а частоты переходов между основными (логическими) и возбужденным (вспомогательным) состояниями дискретного спектра электрона в КТ близки к частоте данной моды. Точная настройка частоты перехода производится путем подачи на управляющий затвор кубита электрического потенциала. В рамках аналитической модели кубитов, когерентно взаимодействующих с квантовым полем МР, разработаны несколько способов управления их состояниями. В частности, предлагаются различные варианты реализации нетривиальных двухкубитных вентилях CNOT и CZ, а также генерации запутанных состояний кубитов. Также автором предложена и проанализирована модель полномасштабного устройства, работающего по данному принципу.

В главе 9 автором разработан подход к моделированию спектроскопического отклика полупроводниковой одноэлектронной ДКТ, взаимодействующей с квантовым полем микрорезонатора и лазерным импульсом. Он помогает выявить специфические особенности динамики

электрон-фотонной системы, связанные со степенью асимметрии частот ДКТ и скоростью фотонной диссипации из резонатора, в частности, возможность когерентного и некогерентного переноса электрона между основными состояниями ДКТ в некотором диапазоне значений параметров системы. Зависимости заселенностей от времени в режиме рабиевских осцилляций подтверждают возможность реализации квантового вентиля NOT как в резонансном, так и в нерезонансном случаях.

В главе 10 описывается концепция устройства, состоящего из кубита памяти и частотного конвертора. Кубит памяти представлен полупроводниковой четырехуровневой ДКТ, которая помещена в МР. ДКТ содержит один электрон в квантованной части зоны проводимости, а МР может заселяться некоторым числом фотонов. Для управления состоянием ДКТ и МР используются лазерные и электростатические поля.

Оценивая результаты диссертационной работы Цуканова А.В., можно сказать, что она содержит оригинальные модели и концепции, нацеленные на реализацию двух альтернативных вариантов масштабируемого твердотельного квантового компьютера. Автор в равной степени успешно применяет аналитический и численный подходы, а также графическую визуализацию для подтверждения корректности закладываемых в модели физических предположений. Изложение материала ведется последовательно и подробно, давая читателю возможность вникнуть и освоить представленный материал.

Автореферат изложен на 33 страницах, включает 13 рисунков, список цитируемой литературы и список основных работ диссертанта. Автореферат полностью соответствует основному содержанию и выводам диссертации.

Новизна и достоверность диссертационной работы

Научная новизна работы Цуканова А.В. заключается в последовательном и глубоком теоретическом рассмотрении класса явлений, связанных с квантовооптическими процессами в твердотельных наноструктурах, и анализе вопросов, возникающих при адаптации данных явлений для обработки квантовой информации. Оригинальность исследований обусловлена выбором носителя кубита (одноэлектронная квантовая точка с дифференцированной ролью основных и возбужденных состояний, управляемая оптическими полями терагерцевого диапазона и электрическими полями затворов) и способами организации взаимодействия между кубитами (транспозиции пробного электрона во вспомогательной структуре или взаимодействие с однофотонными полями резонаторов).

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.

Полнота опубликованных работ

Основные результаты и выводы диссертационной работы в полной мере отражены в научных изданиях и представлены на Российских и Международных конференциях и научных семинарах. По результатам исследований опубликована 31 работа в реферируемых журналах (из которых – 27 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов).

Практическое значение результатов диссертации

Полученные результаты имеют как научное, так и практическое значение. 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.

Обоснованность научных положений и выводов

При получении результатов автор ориентировался на методы, широко применяемые в настоящее время в теоретических исследованиях полупроводниковых низкоразмерных систем. Они базируются на канонических дисциплинах: квантовой механики, физике твердого тела, квантовой оптики и др. Определение характеристик рассматриваемых систем-прототипов кубитов включало в себя численное моделирование квантовой динамики электронных состояний одной или нескольких КТ в рамках подходов Шредингера и Линдблада, анализ диссипативных эффектов, расчет времен и точности выполнения одно-, двух- и трехкубитных квантовых операций на КТ. В качестве входных параметров использовались данные экспериментов, взятые из публикаций в международных научных изданиях.

Проверка результатов осуществлялась путем сравнения с уже известными частными и предельными случаями. Кроме того, если были получены приближенные аналитические и численные результаты, то автором проводился анализ их соответствия друг другу.

Замечания по диссертационной работе

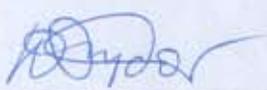
1. В диссертационной работе при исследовании диссипативных эффектов автор отдает предпочтение феноменологическому подходу, задавая параметры уравнения из некоторого диапазона значений. Возможно, было бы интересно рассчитать их (например, скорости электрон-фононной релаксации) в рамках определенной микроскопической модели.

2. В главе 7, где рассматривается модель полномасштабного квантового регистра на донорных атомах в полупроводнике, недостаточно подробно исследован вопрос о влиянии высоковозбужденных связанных состояний электрона на выполнение операции транспозиции заряда. Именно, квазиконтинуальная структура спектра возбужденных донорных атомов резко отличается от ярко выраженного дискретного спектра квантовых точек, что может усложнить адаптацию теории квантовых вентилях, развитую в предыдущих главах для квантовых точек.

3. Диссертация в целом весьма тщательно оформлена и хорошо читается, однако небольшое замечание следует все же адресовать автору в связи с тем, что не на всех рисунках имеются русифицированные надписи - в частности, на рис. 2.3 (стр. 71), а также рис. 3.5 (стр. 105) и рис. 5.9 (стр. 151).

Указанные замечания касаются полноты представления полученных автором результатов и несколько не принижают научную и практическую ценность диссертационной работы и не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертационная работа «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях» удовлетворяет всем необходимым требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Цуканов Александр Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 — «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент:


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

Рудой Юрий Григорьевич
Профессор Института физических исследований и технологий
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН)
Адрес: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6
Тел.: 8 (495) 955-08-38; e-mail: rudikar@mail.ru

Подпись профессора Ю.Г. Рудого удостоверяю

Ученый секретарь Ученого Совета РУДН
Профессор Савчин В.М.



/В.М. Савчин/