

УТВЕРЖДАЮ

Проректор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,
д. ф.-м. н., профессор

Федянин Андрей Анатольевич

« » _____ 2017 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о 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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа А.В.Цуканова посвящена теоретическому исследованию твердотельных квантовых точек и возможности их использования для кодирования, обработки, транспортировки и хранения квантовой информации, а также для выполнения полномасштабных квантовых вычислений.

Направление исследование чрезвычайно актуально. На сегодняшний день известно несколько физических моделей, на основе которых возможно построение полномасштабного квантового вычислительного устройства. Среди них выделим сверхпроводящие структуры, линейные фотонные устройства, нейтральные атомы и ионы в ловушках, примесные центры в кристаллах, а также твердотельные квантовые точки (КТ). Степень проработки каждой из названных моделей можно оценивать по выполняемости тех или иных наборов критериев, например, Ди Винченцо или Валиева. Если с фундаментальной физической точки зрения уровень

имеющихся сегодня результатов можно считать вполне удовлетворительным, то с точки зрения воплощения фундаментальных идей в конкретные технологии налицо существенно разные уровни. Тем не менее, перечисленные модели вполне адекватны и построение мелкомасштабных квантовых компьютеров, а также квантовых симуляторов вполне реалистичная задача, решение которой можно ожидать в ближайшие несколько лет.

Одной из этих физических моделей и посвящена настоящая диссертационная работа. Следует отметить, что Автор работы - А.В.Цуканов долгое время работает в физико-технологическом институте РАН, в котором рассматриваемые задачи являются приоритетными и над решением которых занимается коллектив квалифицированных сотрудников. Поэтому уровень проведенных исследований является крайне высоким. В этой связи, разработка твердотельных квантовых регистров на основе КТ, как одиночных, так и двойных, расчет их основных характеристик и оценка возможности масштабирования представляет собой весьма **актуальную научную и практическую задачу.**

В работе ставится шесть конкретных теоретических задач, которые полностью соответствуют поставленной цели.

Диссертация состоит десяти глав, выводов и заключения, списка литературы. Содержит 371 страницу, включая 126 рисунков и 338 библиографических ссылок.

Во **введении** отражена актуальность работы, степень разработанности темы исследования, научная новизна и значимость работы, сформулированы две основные цели (разработка полупроводниковой структуры - квантового регистра - на основе одноэлектронных квантовых точек (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 высокочастотных оптических МР и квантовых сетях на их основе) и шесть задач, решенных для достижения этих целей. Приводятся основные положения, вынесенные на защиту и обосновывается достоверность результатов.

В Главе 1 подробно проанализировано состояние теории и эксперимента, касающихся использования полупроводниковых КТ в квантовой информатике. Этот подробный обзор, фактически, обосновывает направление исследований по теме диссертационной работы.

Глава 2 посвящена исследованию когерентной динамики зарядового кубита на основе двойной квантовой точки (ДКТ) с электростатическим управлением. Эти работы были начаты во ФТИАНе еще в 2000 г. В этом направлении А.В.Цукановым были получены следующие 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 двухкубитным операциям при наличии паразитной динамики. Основная цель этой главы - выявление основных закономерностей эволюции электронов в полупроводниковых ДКТ - зарядовых кубитах - под действием переменных внешних полей и рассмотрены различные способы кодировки квантовой информации.

В Главе 3 А.В.Цукановым 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 или двойной КТ) благодаря выбору параметров структуры и поля. Аналитически рассчитана поправка к решению в приближении вращающейся волны (RWA) и оценена ошибка, связанная с использованием этого распространенного приближения.

В Главе 4 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 А.В.Цукановым предложен 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 Тоффоли 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 посвящена описанию основных принципов, лежащих в основе предложенного А.В.Цукановым 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, предложенная 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 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.

В Главе 8 рассмотрены одно- и двухкубитные операции на зарядовых ДКТ кубитах, сформированных внутри высокодобротного 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 вентилей CNOT и CZ, а также генерации запутанных состояний кубитов. Также Автором предложена и проанализирована модель полномасштабного устройства, работающего по данному принципу.

В Главе 9 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.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

Замечания:

1. В Главе 4 при описании резонансных и рамановских переходов в двухэлектронной ДКТ в бихроматическом лазерном поле, отсутствует привязка к конкретным экспериментальным параметрам. Так, на рисунке 4.2. приводится схема уровней/переходов в идеализированном и абстрактном случае, однако хотелось бы понять, насколько эта схема близка к реалистичной ситуации и сделать соответствующие оценки.

2. Подписи (обозначения отложенных по осям величин) на большинстве графических зависимостей выполнены на английском языке. Вместе с тем, из текста не всегда терминологически понятно, о чем идет речь. Например, на рисунке 8.6 по оси ординат отложены "Populations", в подписи к рисунку значится: "Рис. 8.7. Первый шаг реализации вентиля Адамара, приводящий к формированию суперпозиции равновзвешенных логических состояний...", а в тексте при ссылке на этот рисунок говорится: "параметры импульса приведены на рис. 8.7". Какое отношение к этим фразам имеет термин "Populations", не вполне очевидно. Таких примеров в работе имеется несколько.

3. В восьмой Главе (стр.272) рассматривается состояние системы в виде суперпозиции трех компонент: первая компонента отвечает локализации электронов в логических состояниях обеих ДКТ и n фотонам в МР, вторая компонента характеризует однократное возбуждение электрона в какой-либо из ДКТ и присутствие $n - 1$ фотонов в МР, а третья компонента описывает двукратное возбуждение в системе ДКТ и наличие $n - 2$ фотонов в МР. Представляется, что описание на языке чистых состояний возможно только при ряде допущений, которые не были четко сформулированы в рамках используемой модели.

В целом, перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация содержит достаточно подробную библиографию по обсуждаемой тематике - этому посвящена отдельная (первая) глава.

Отметим, что результаты работы четко структурированы, что облегчает изучение работы. В большинстве рассмотренных задач Автор иллюстрирует материалы численными оценками с параметрами взятыми из экспериментальных данных. Так в Главе 5 в деталях рассмотрена наноструктура, сформированная из шести квантовых ям и расчетные материалы иллюстрируются многочисленными зависимостями, изображенных на рисунках 5.3-5.5. Там (п.5.2.2) же рассмотрена и проанализирована конкретная структура на основе линейной цепочки двумерных КТ и содержащей один пробный электрон - для этой структуры приводятся значения всех технологических параметров, достаточных для ее полного описания. Впоследствии эти результаты позволяют Автору предложить транспозиционную реализацию вентиля CPHASE для управления условной фазовой эволюцией двух кубитов.

Особенно выделим результаты Главы 6, посвященные реализации условных квантовых операций с участием двух, трех и девяти зарядовых кубитов с использованием вспомогательной структуры на основе полупроводниковых КТ. Представляется, что эти операции могут быть реализованы в эксперименте.

Крайне перспективными представляются результаты Главы 8 - в контексте высокой степени интегрируемости электрон-фотонной квантовой структуры.

Достоверность результатов не вызывает сомнения. Как уже отмечалось выше, они получены в одном из профильных институтов РАН, неоднократно обсуждались на различных международных конференциях и опубликованы.

Основные результаты проведенных исследований опубликованы в 37 статьях в реферируемых тематических научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, и представлялись на профильных отечественных и зарубежных научных конференциях.

Автореферат диссертации правильно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях» соответствует пп. 9-14 раздела II "Положения о порядке присуждения ученых степеней" №842 от 24.09.2013 (ред. от 21.04.2016 №335), а ее автор – Цуканов Александр Викторович – несомненно заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. Доклад по теме диссертации был заслушан на семинаре кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Отзыв подготовил:

Профессор кафедры квантовой электроники
физического факультета МГУ, д. ф.-м. н.



Кулик Сергей Павлович
«__» ноября 2017 г.

Декан физического факультета МГУ
профессор, д. ф.-м. н.



Сысоев Николай Николаевич
«__» ноября 2017 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М.В.Ломоносова»

Почтовый адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1,
Телефон (495) 939-10-00; Сайт: <https://www.msu.ru/>; E-mail: info@rector.msu.ru