

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 нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Актуальность диссертации

Идея создания квантового компьютера, появившаяся в середине 80-х годов 20 века, привела в настоящее время к потоку интенсивных теоретических и экспериментальных исследований квантовых информационных технологий. Одним из ключевых вопросов в этих исследованиях является поиск наиболее подходящих квантовых систем для реализации базовых вентилей, используемых в выполнении квантовых вычислений. Квантовые точки (КТ), естественно интегрируемые в существующие полупроводниковые технологии, являются одним из наиболее перспективных объектов, которые могут быть использованы для экспериментальной реализации практической квантовой информатики.

Особенно большой интерес представляет использование КТ в качестве быстрого квантового процессора (регистра) для выполнения логических одно- и двухкубитных операций. Данная идея, предложенная еще в работах Б. Кейна, оказалась очень плодотворной и активно разрабатывается в настоящее время. Этому способствуют экспериментальные возможности синтеза КТ с различными спектроскопическими свойствами, существующие микро- и нано-полупроводниковые технологии управления состоянием отдельными КТ. Стоит также отметить, что в настоящее время КТ уже используются как источники однофотонных полей, квантовые сенсоры, растущий интерес вызывает реализация ячеек памяти на КТ и т.д. Интенсивные исследования использования КТ в квантовой информатике

отражаются регулярным появлением аналитических обзоров в ведущих физических журналах, включая журнал Rev. Mod. Physics. В связи с этим общая тематика диссертационной работы Александра Викторовича Цуканова представляется актуальной, а ее появление - своевременным.

В диссертационную работу А.В.Цуканова вошли результаты его теоретических исследований за период с 2002 г. по 2017 г. В качестве объекта исследований автор выбрал один из наиболее перспективных вариантов КТ - «зарядовый» кубит, реализуемый на двух орбитальных электронных состояниях КТ, которые позволяют обеспечить высокую надежность функционирования и наибольшее время хранения квантовой информации. Влияние других квантовых состояний КТ также подробно исследуется в диссертации при изучении квантовых процессов в системе КТ.

Рассматриваются различные типы зарядовых кубитов на КТ. Для управления их квантовым состоянием автор предлагает ряд вариантов взаимодействия КТ с когерентным полем лазера и/или квантовым полем микрорезонатора и использованием дополнительных контролирующих внешних электростатических полей. Для реализации базовых квантовых вентилей автором разработан ряд оригинальных схем, включающих зарядовые кубиты на КТ, а также их пары и тройки, последние необходимы для выполнения сложных многокубитных операций. Наконец, автор показывает, как предложенные схемы на КТ могут быть использованы в качестве структурных ячеек универсального полномасштабного устройства.

Основной проблемой квантового компьютера, в том числе основанного на использовании системы КТ, является реализация высокоточного управления квантовой динамикой системы кубитов и обеспечение высокого подавления релаксационных процессов в их поведении. При решении этих проблем автор теоретически исследует предлагаемые им способы квантового контроля динамики КТ, учитывая её форму, включая пространственное позиционирование и ориентацию КТ относительно внешних управляющих устройств, реальные физические условия эксперимента, существующие

технологические возможности и ограничения, способы организации заданного взаимодействия с КТ и с системой точек, негативное влияние эффектов декогеренции, вызванных взаимодействием с окружением. Теоретический анализ этого широкого спектра проблем проводится с привлечением современных подходов квантовой оптики на основе построения адекватных эксперименту физических моделей с привлечением численных расчетов, позволяющих максимально точно учесть все основные физические факторы. Перечень рассмотренных актуальных задач оказался весьма широк, что делает результаты диссертации интересными, научно значимыми и важными для практики полупроводниковой квантовой информатики.

В связи с вышеизложенным следует считать, что поставленная в диссертации цель и сформулированные задачи - разработка полупроводникового квантового процессора 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 квантовых сетях на их основе — являются актуальными и своевременными как в научном, так и в практическом плане.

Анализ и оценка содержания диссертации

Диссертация А.В.Цуканова изложена на 371 странице и включает введение, десять глав, заключение и список цитируемой литературы.

В Главе 1 приводится анализ современного состояния теории и эксперимента в области использования полупроводниковых КТ для решения задач квантовой информатики, обосновывается актуальность выбранной темы исследования диссертации.

Глава 2 посвящена исследованию закономерностей реализации когерентной динамики двойной зарядовой КТ (ДКТ) под действием внешних электрических полей. Первые работы по изучению схем квантового

компьютера на подобных ДТК были проведены в работах К.А.Валиева с сотрудниками. Простота физической модели и наличие технологических возможностей реализации зарядового ДКТ делает актуальным поиски путей оптимальной реализации данного типа кубита и его использования для выполнения базовых квантовых вентилей, реализации на его основе различных способов кодировки квантовой информации.

А.В.Цуканов значительно развил теоретическое описание когерентной динамики ДКТ, получив ряд аналитических решений, описывающих когерентную динамику одного и двух кубитов, и показал, как каждая квантовая логическая операция может определяться соответствующим набором амплитуд и длительностей подаваемых на затворы электрических импульсов. На основе предложенной им модели, учтено влияние эффектов декогеренции и найдены способы их минимизации, показано, что использование собственных состояний гамильтониана структуры является оптимальным для реализации базовых квантовых вентилей. Полученные в главе результаты явились важным шагом в разработке зарядовой ДКТ. Эти результаты открыли новые возможности в реализации квантовых операций на таком варианте квантового регистра.

В Главе 3 автором теоретически исследована квантовая динамика электрона при воздействии лазерного импульса на наноструктуру, состоящую из двух слегка отличающихся туннельно-связанных КТ. Найдены аналитические решения, описывающие квантовую динамику в многоуровневой квантовой системе. Детально изучена зависимость квантовых осцилляций Раби от параметров квантовых точек, светового поля, установлены режимы, при которых возможен высокоэффективный переход электрона между основными состояниями, локализованными в разных КТ через одно общее возбужденное состояние, возникающее благодаря сильному туннелированию электрона между двумя соседними ямами. Получено общее аналитическое решение, которое позволило определить условия на спектроскопические параметры соседних квантовых точек, при которых возможен эффективный

перенос электрона между двумя основными состояниями. Данное решение было обобщено на четырехуровневую систему, что позволило выявить возможности реализации кубита на одиночной КТ или ДКТ благодаря выбору параметров структуры и параметров светового импульса, учитывая реальное соотношение туннельной и оптической частот Раби.

Разработанный теоретический подход представляется также очень полезным для изучения других квантовых систем, содержащих несколько связанных взаимодействием уровней энергии. В качестве интересного примера А.В.Цуканов рассмотрел когерентную динамику электрона в структуре из трех КТ в резонансном лазерном поле, где он нашел, что перенос электрона между точками может также хорошо описываться двухуровневой моделью. Этот подход автор с успехом развил в последующих главах диссертации при рассмотрении других задач.

В Главе 4 теоретически изучена когерентная динамика двух электронов, находящихся в системе двух туннельно-связанных КТ во внешнем резонансном электромагнитном поле. Рассмотренная квантовая система представляет особенный интерес для реализации двухкубитной операции. Показано, что в этой системе возможна реализация селективного переноса электрона между соседними КТ. На основе найденного аналитического решения установлены параметры управляющего светового импульса (длительность и амплитуда), при которых вероятность переноса электронов может быть близка к единице для заранее известных спектроскопических параметров КТ. Наконец, автором показано, что пару электронов можно переводить в заданное запутанное квантовое состояние при выборе соответствующих параметров светового импульса, что представляет несомненный интерес для выполнения полного набора квантовых вентилей на системе КТ.

В Главе 5 развитые в предыдущих главах подходы применяются к изучению более сложной системы КТ. Автор рассмотрел модели квантового транспорта электрона в цепочке туннельно-связанных КТ, представляющих собой

квазилинейную и кольцевую наноструктуру. Настоящая задача представляет большой интерес для решения проблем управляемого квантового транспорта в системе из большого числа кубитов с одновременной организацией квантовых вентилях на системе КТ. При этом автором изучена возможность селективного переноса электрона между выбранными двумя КТ-ми в цепочке индуцируемого действием лазерного импульса. Найдены аналитические зависимости показали, что возможен высокоэффективный перенос электрона в заданные основные состояния этих КТ при подходящем выборе параметров светового импульса, определяемых параметрами цепочки КТ. Изучено влияние факторов, приводящих к уменьшению вероятности переноса в реальной физической системе, например, в системе донорных атомов фосфора в кремнии и в других системах подобного рода. Найдено условие реализации высокой селективности и скорости переноса в заданный момент времени. На основе данного подхода предложен алгоритм реализации операции «controlled-phase» на двух зарядовых кубитах. Полученные результаты представляют большой интерес для работ с кубитами, формируемых в системе связанных КТ и, безусловно, будет стимулировать появление новых исследований.

В Главе 6 рассматривается система КТ при этом, автор предложил оригинальный способ реализации квантовых вентилях с участием двух, трех и девяти зарядовых кубитов. При выполнении этих вентилях автор вновь использует оптически возбужденные гибридизированные состояния в системе КТ, чьи энергии и волновые функции зависят от орбитальных состояний КТ, выполняющих роль квантовых битов. Параметры структуры выбираются таким образом, при котором различным зарядовым состояниям системы КТ соответствуют различные частотные сдвиги. Соответственно, при выбранном возбуждении световыми импульсами становится возможным контролировать фазовый набег зарядовых состояний в системе КТ, что, в свою очередь, можно ассоциировать с квантовой эволюцией выбранного состояния системы кубитов. Контролируя таким путем фазу

вспомогательных состояний системы КТ, автор предлагает реализацию двух и трехкубитных вентиляей, а также операций CNOT и Тоффоли.

В оригинальной разработанной автором на этой основе схеме вентиль CNOT требует для своего выполнения только четыре операции - два вентиля Адамара и два $\pi/2$ -инверсионных перехода. Этот алгоритм реализации оказывается более экономным, чем стандартные алгоритмы, базирующиеся на использовании некоторого универсального набора одно- и двухкубитных вентиляей. Автором был развит и подход для реализации квантового регистра из 9-ти кубитов на системе КТ, который демонстрирует значительное увеличение скорости выполнения операций. Подход может быть использован и для более сложных квантовых систем, что представляет несомненный интерес.

В Главе 7, используя разработанные методы селективного когерентного контроля кубитов в системе зарядовых КТ, автор разрабатывает основные принципы, лежащие в основе предлагаемого им квантового вычислительного устройства. Отличительной особенностью данного подхода является использование оптических импульсов для реализации квантовых вентиляей на основе возбуждения рамановских переходов между логическими состояниями КТ. Наряду с селективностью лазерного возбуждения и применением управляющих электростатических полей для выбора надлежащего квантового транспорта, автор использует методы подавления эффектов декогеренции при переводе системы КТ на вспомогательные квантовые состояния. Разработанная схема квантовых операций представляет несомненный интерес не только в качестве перспективного варианта квантового вычислителя на системе КТ, но может быть использована и для разработки новых схем фотонного квантового компьютера.

В Главе 8 автором предлагается вариант многокубитового квантового вычислителя, основанного на использовании зарядовых ДКТ кубитов, сформированных внутри высокочастотного полупроводникового микрорезонатора. КТ располагаются в пучностях одной из его собственных

оптических мод, а частоты электронных переходов между основными (логическими) и возбужденным (вспомогательным) состояниями электрона в КТ выбираются близкими к частоте моды микрорезонатора. Предложена аналитическая модель для описания когерентного взаимодействия квантовых точек с квантовым полем МР и на её основе разработаны способы управления состояниями обобщенной квантовой системы. В рассматриваемой модели роль внешних лазерных полей выполняют однофотонные возбуждения, которые используются как для квантового транспорта, так и для реализации одно- и двухкубитных вентилей CNOT и CZ, используя не прямые (косвенные) взаимодействия КТ через поле фотонов. Автором предложена и проанализирована модель полномасштабного устройства на данном типе систем КТ в микрорезонаторе, которые способны работать в пикосекундном масштабе времен.

В Главе 9 автор разрабатывает теоретический подход, который позволяет детальным образом анализировать динамические и кинетические свойства спектроскопического отклика полупроводниковой одноэлектронной ДКТ при её взаимодействии с квантовым полем микрорезонатора и с внешним лазерным полем. В данном подходе учитывается влияние нескольких каналов диссипации, характеризующих неидеальность микрорезонатора, а также спонтанные переходы между уровнями КТ и дефазировку, что делает этот подход универсальным и интересным для решения широкого круга задач. Значительное внимание автор уделяет рассмотрению влияния электрон-фононной релаксации, что важно при рассмотрении квантовых систем, находящихся при реальных температурах, вплоть до гелиевых и даже ниже.

Развитый подход помогает выявлять особенности влияния асимметрии частот ДКТ и скорости фотонной диссипации из резонатора на возможность когерентного и некогерентного переноса электрона между основными состояниями ДКТ в некотором диапазоне значений параметров системы. Использование данного подхода позволило А.В.Цуканову найти реальные экспериментальные условия применимости изучаемых протоколов в

реализации базовых квантовых вентилей. Безусловно, что развитые математические и численные методы будут использованы автором и его коллегами в дальнейших исследованиях, но и интересуют специалистов широкого круга, разрабатывающих оптические схемы универсальных квантовых вычислений.

Глава 10 посвящена разработке ячейки квантовой памяти, включающей ДКТ и связанный с ней частотный конвертор (ОКТ). Предложенная и проанализированная схема решает задачу записи светового сигнала, частота которого соответствует телекоммуникационному диапазону частот, на основные квантовые состояния полупроводниковой четырехуровневой ДКТ, содержащей один электрон. Для решения этой задачи на первом этапе предлагается использовать частотный конвертор, который, как и ДКТ помещен в общий низкочастотный микрорезонатор. После поглощения входного фотона, возникшее в ОКР микроволновое возбуждение передается в ДКТ через поле микрорезонатора. Оставшееся в ОКР экситонное возбуждение снимается затем приложением дополнительного лазерного излучения.

Автор предлагает и анализирует несколько сценариев высокоэффективного переноса входного оптического однофотонного сигнала на долгоживущие квантовые состояния ДКТ. При этом для управления квантовой динамикой ДКТ, ОКТ и МР используются как лазерные, так и электростатические поля, последние позволяют контролировать резонансный характер взаимодействия в системе, обеспечивая обратимый перенос микроволнового возбуждения между ОКР и ДКТ. Теоретический анализ и проведенные численные расчеты позволили автору найти физические параметры, при которых квантовая эффективность предложенной квантовой памяти может быть выше 90%. Следует подчеркнуть, что данная схема позволяет записывать сигнальные фотоны на основные состояния ДКТ, время жизни которых может быть на несколько порядков больше, чем это имеет место для возбужденных экситонных состояний КТ. Последнее делает

предложенный вариант квантовой памяти весьма интересным для экспериментальной реализации.

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

Новизна и достоверность диссертационной работы

Автором проведено тщательное многостороннее теоретическое исследование свойств зарядовых кубитов на полупроводниковых КТ и их использование для решения фундаментальных и прикладных задач квантовой информатики. Полученные результаты образуют важное самостоятельное направление исследований в области полупроводниковой квантовой информатики. При решении поставленных задач автором разработаны теоретические методы большой универсальности, основанные на использовании современных методов квантовой оптики и физики низкоразмерных полупроводниковых структур. Полученные результаты сводятся в предельных случаях к известным результатам, а в более общих случаях надежно подтверждаются численными расчетами, используя строгие проверенные подходы. Достоверность результатов диссертационной работы Цуканова А.В. обусловлена также и использованием общепризнанных параметров квантовых точек и современных методов их экспериментального контроля. Полученные в работе результаты являются оригинальными, представляют несомненно большой интерес с научной точки зрения и могут быть использованы при решении новых многих актуальных задач квантовой информатики, а также при проектировании принципиальных схем новых квантовых приборов.

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 диссертации опубликована 31 работа в научных журналах (из них – 27 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ в качестве ведущих рецензируемых журналов), 6 глав в монографиях.

Практическое значение результатов диссертации

Полученные результаты имеют большое научное и практическое значение для разработки полупроводниковых квантовых технологий. А именно, разработанные теоретические методы и предложенные подходы могут быть использованы для поиска эффективных подходов в реализации одно- и многокубитных вентилях, создания универсального квантового компьютера на системе квантовых точек. Предложенные схемы на зарядовых квантовых точках представляют большой интерес для разработки новых методов управления массивом кубитов. Полученные в диссертации результаты также важны для решения широкого круга современных задач квантовой оптики, физики и техники нанополупроводников, квантовой памяти и коммуникаций. Полученные научные результаты могут быть использованы в ряде научных учреждений Российской академии науки и университетах Российской Федерации, в также в научно-производственных фирмах, разрабатывающих современные полупроводниковые приборы и т.д.

Обоснованность научных положений и выводов

Решая поставленные в диссертации задачи, автор использовал современные теоретические подходы квантовой оптики, физики нанополупроводников. Данные о физических параметрах квантовых точек, световых источников, различных волноводов, микрорезонаторов и других физических систем были взяты автором из надежных литературных источников.

Научные положения и выводы подтверждаются автором на основе проведения численного исследования предложенных физических моделей и проверки представленных решений с ранее известными результатами в

предельных случаях. Таким образом, обоснованность научных достижений и выводов не вызывает каких-либо оснований.

Замечания по диссертационной работе

1. В задаче о реализации вентиля управляемой фазы (CPhase-gate) в системе из трех кубитов, связанных с одной общей (вспомогательной) квантовой точкой, желательно было оценить влияние релаксации на сложную структуру уровней вспомогательной квантовой точки, что важно для выбора возможных параметров в практической реализации предлагаемой модели.

2. В задаче о контролируемом переносе электрона в цепочке квантовых точек, было бы целесообразно обсудить возможности не диссипативного переноса электрона не только в присутствии стационарного лазерного излучения, но и в присутствии последовательности нескольких световых импульсов, что часто используется в нестационарной когерентной оптике и магнитном резонансе, например, в эффектах фотонного/спинового эха, при разработке методов подавления эффектов декогеренции. В таком режиме когерентного контроля появляется дополнительная возможность управления фазовыми соотношениями между световыми полями и возбуждаемой в среде квантовой когерентностью. В связи с чем можно ожидать, как это часто бывает, что такие эксперименты позволят улучшить управление процессами переноса кубита в цепочке.

3. При рассмотрении предложенной автором схемы квантовой памяти, представляется желательным более детально изучить влияние процессов декогеренции в первой квантовой точке кубита (в частотном конверторе) ячейки памяти. Здесь следует отметить, что возвращение остаточного экситонного возбуждения внешним лазерным излучением, может сопровождаться и нежелательным возбуждением частотного конвертора. Решение этой проблемы может наложить ограничение на выбор характера кодирования сигнальных фотонных кубитов, что следовало бы автору обсудить в 10 главе диссертации.

Данные замечания не затрагивают полученные результаты диссертационной работы, её научную и практическую ценность и не снижают её общей высокой оценки. 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 физико-математических наук, а её автор Цуканов Александр Викторович, безусловно, 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:

Доктор физико-математических наук, профессор,
директор Казанского квантового центра КНИТУ-
КАИ им. А.Н.Туполева 420029 Россия, Казань,
ул. К.Маркса, д. 10.

E-mail: samoi@yandex.ru, тел. 8(903) 342-14-09

С.А.Моисеев

