

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. профессора Фельдмана Эдуарда Беньяминовича на диссертацию Цуканова Александра Викторовича «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 «твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах»

Диссертация соискателя Цуканова Александра Викторовича посвящена теоретическим методам разработки квантовых устройств на основе использования полупроводниковых квантовых точек в качестве элементной базы. В настоящее время предложены разнообразные методы для реализации квантовых приборов и устройств (в первую очередь квантовых компьютеров) с различными элементными базами, и трудно выбрать наиболее перспективный подход, позволяющий практически реализовать преимущества квантовых устройств над их классическими аналогами. Для квантовых компьютеров такие преимущества выражаются прежде всего в том, что такой компьютер позволяет эффективно решать задачи, которые практически недоступны для классических компьютеров. Основными проблемами на пути создания квантовых приборов являются проблема декогеренции и создание масштабируемых регистров и их основных узлов. Автор остановился на использовании полупроводниковых квантовых точек в качестве элементной базы квантовых приборов и устройств, и имеются веские основания полагать, что развитые технологии позволяют преодолеть на таких материалах как проблему декогеренции, так и проблему масштабируемости. Одной из основных задач, успешно решенных диссертантом, является оригинальный дизайн моделей масштабируемых регистров на полупроводниковых квантовых точках (КТ). Представляют несомненный интерес разработанные автором способы кодировки квантовой информации и реализации квантовых операций на зарядовых кубитах посредством оптического управления орбитальными состояниями валентных электронов в донорных атомах в полупроводниковой матрице, а также рассмотрение возможности масштабирования данной схемы.

Диссертационная работа изложена на 371-ой странице, включая 126 рисунков и

338 библиографических ссылок, и состоит из введения, десяти глав, выводов, заключения и списка литературы.

Во введении автор обосновывает актуальность исследований, проведенных при выполнении диссертационной работы, формулирует цели и задачи работы, научную новизну и практическую значимость проведенных исследований. Приводятся также сведения об апробации и публикации полученных результатов, формулируются защищаемые положения.

В Главе 1 подробно проанализировано состояние теории и эксперимента, связанных с использованием полупроводниковых КТ в квантовой информатике. Данный обзор обосновывает направление исследований по теме диссертации. Отметим также, что представленный обзор является полезным введением в твердотельную оптику.

Глава 2 продолжает исследования когерентной динамики зарядового кубита на двойной квантовой точке (ДКТ) с электростатическим управлением, начатые во ФТИАНе в 2000 г. 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 двухкубитным 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 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.

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. Представляет большой интерес предложенная 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 также алгоритм реализации операции «controlled-phase» на двух зарядовых кубитах.

В Главе 6 разработан оригинальный 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. Предложен простой алгоритм реализации нетривиального трехкубитного вентиля Тоффли посредством электронных возбуждений во вспомогательной структуре, обусловленных состоянием трехкубитного кластера. 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.

В Главе 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 также возможность масштабирования данной схемы.

В Главе 8 исследована возможность выполнения одно- и двухкубитных операций на зарядовых ДКТ кубитах, когерентно взаимодействующих с полем микрорезонатора (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.

В Главе 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.

В Главе 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-конвертером и лазером.

Основные результаты работы опубликованы в 27 статьях в ведущих рецензируемых журналах и в 6 главах в монографиях, а также представлены автором лично на ряде российских и международных конференций, что подтверждает достоверность и обоснованность результатов.

Диссертация хорошо оформлена, написана ясным и четким языком, схемы и рисунки прекрасно иллюстрируют изложенный материал. Автор продемонстрировал высокий уровень теоретической подготовки по физике твердого тела, микро- и нано-электронике, спиновой динамике и квантовой теории информации.

Работа мирового уровня носит самостоятельный, законченный характер и вносит важный вклад в разработку масштабируемых квантовых приборов и устройств, в которых в качестве элементной базы используются полупроводниковые квантовые точки. Проведенные автором многоплановые

исследования возможностей полупроводниковых квантовых точек для квантовых вычислений могут служить основой для создания соответствующего научного направления. Актуальность и новизна проведенных исследований не вызывает сомнений.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Из недостатков диссертационной работы отметим следующие.

1. Реализуя квантовые операции, нужно иметь в виду, что фантастические преимущества квантовых приборов по сравнению с классическими аналогами возникают благодаря квантовым корреляциям в многокубитных системах. Количественно квантовые корреляции оцениваются с помощью запутанности (для чистых состояний) или квантового дискорда для смешанных состояний. В диссертации не приводится никакой информации о квантовых корреляциях (запутанности или дискорда) в многокубитных системах на полупроводниковых квантовых точках.

2. Практически все вычисления и анализ квантовых операций проведены в диссертации для чистых состояний, когда система может быть описана волновой функцией. Большинство развитых методов не обобщаются для смешанных состояний, когда многокубитная система описывается матрицей плотности.

3. На страницах 336 - 337 диссертации автор, описывая диссипативные эффекты, предлагает подход, аналогичный переходу к "лиувиллевскому представлению" (U. Fano, Rev. Mod. Phys. 29, 74 (1957)). К сожалению, эта аналогия в диссертации не обсуждается.

4. Представленная работа является теоретической. Однако автор уделил недостаточно внимания теоретическим аспектам развитых методов и подходов в автореферате, где приведена всего лишь одна формула.

5. В автореферате диссертации встречаются фразы "всеобъемлющий обзорный анализ", "высокое качество полученных результатов" и т.д. Полагаю, что такого рода оценки уместно оставить оппонентам.

Указанные недостатки носят рекомендательный характер и ни в коей мере

не умаляют общей высокой оценки проведенного исследования.

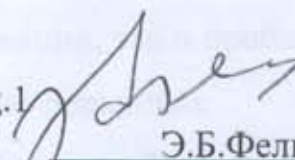
Выполненная соискателем работа соответствует паспорту специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах по формуле специальности и областям исследования пп.1 и 4.

На основании рассмотрения содержания диссертации, автореферата и опубликованных автором работ сделано следующее заключение:

Считаю, что диссертационная работа «Полупроводниковые квантовые точки с оптическим и электрическим управлением в квантовых вычислениях» удовлетворяет требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней” (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 “О порядке присуждения ученых степеней”), предъявляемых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автор работы Цуканов Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.27.01 – « твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано-электроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор
Института проблем химической физики РАН
142432 Российская Федерация, Московская обл.,
г.Черноголовка, проспект академика Н.Н.Семенова, д.1



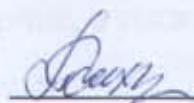
Э.Б.Фельдман
Дата: 10 ноября 2017 года

Телефон: 8-906-739-7710 E-mail:
efeldman@icp.ac.ru

Подпись профессора Э.Б.Фельдмана

Заверяю

Ученый секретарь Института проблем химической
Физики РАН д.х.н



Б.Л.Психа