

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Астафьева Олега Владимировича «Квантовая оптика на искусственных квантовых системах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы

Полупроводниковые квантовые ямы и квантовые точки («атомы наизнанку») – по-видимому, наиболее известные искусственные объекты, в которых квантование движения квазичастиц стало управляемым. Развитие нанотехнологий изготовления структур субмикронного размера и методов экспериментальной физики позволило контролировать одиночные квазичастицы или кванты потока, а также манипулировать квантовыми состояниями в электронных схемах при сверхнизких температурах.

Благодаря легко достижимой физически сильной связи в таких системах, искусственные квантовые наноструктуры открыли новые возможности для изучения фундаментальных физических эффектов, а также широкого диапазона контроля квантовых состояний с помощью электрических сигналов. Это позволило реализовывать условия наблюдений, ранее недостижимые в квантовой оптике на естественных атомах. В результате открылись возможности изучения явлений фундаментальной квантовой физики «в чистом виде», а в прикладном аспекте – строить функциональные устройства, принцип работы которых базируется на квантовой механике. И автор диссертации был одним из тех, кто внес признанный вклад в эту область знаний.

Понятия квантовых вычислений и квантовых процессоров уже перестали быть заманчивой абстракцией для реализации в далеком будущем. Они уже доступны для решения некоторых специальных задач с недостижимой и, можно сказать, непостижимой ранее скоростью. Круг таких задач непрерывно расширяется, что делает разработку элементной базы квантовых вычислений все более востребованной. Другие перспективные применения искусственных квантовых наноструктур – это детекторы и метрология, работающие на принципах квантовой механики.

В работе Астафьева О.В. были поставлены следующие значительные цели:

- исследование электронного транспорта в квантовых точках на основе двумерного электронного газа в полупроводниковых гетероструктурах в режиме одноэлектронного транзистора; изучение их взаимодействия с электромагнитным излучением и разработка детектора одиночных фотонов на частоте циклотронного резонанса в дальнем инфракрасном диапазоне; разработка детектора одиночных фотонов на частоте плазменного резонанса квантовой точки (субтерагерцовый диапазон);
- разработка сверхпроводниковых квантовых битов (кубитов) на чипе и исследование их физических характеристик, включая механизмы декогеренции; реализация однократного считывания кубитов, когерентного взаимодействия двух связанных сверхпроводниковых кубитов, первого двухкубитного вентиля CNOT; разработка новых схем сверхпроводниковых кубитов;
- исследование взаимодействия СВЧ излучения с искусственными атомами (ИА) на основе сверхпроводниковых квантовых систем, реализация условий сильной связи ИА с полем различных типов резонаторов и фундаментальных физических эффектов, к которым она приводит. Демонстрация физических явлений квантовой оптики на одиночном ИА, таких, как резонансная флуоресценция, спонтанная эмиссия, электромагнитно-индуцированная прозрачность, квантовый усилитель, и др.; реализация высокоэффективного перестраиваемого источника фотонов по требованию;
- разработка резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в пьезоэлектриках в СВЧ диапазоне, демонстрация условий сильной связи между ИА и ПАВ резонатором и квантового режима резонатора на ПАВ; реализация квантово-оптических эффектов на акустических системах;
- демонстрация когерентного квантового эффекта проскальзывания фазы (CQPS - Coherent Quantum Phase Slip effect) в нанопроволоках, суперпозиции квантов магнитного потока в сверхпроводящем колечке с нанопроволокой; наблюдение эффектов интерференции двух амплитуд проскальзывания фазы - эффект Ааронова-Кашера, и нестационарного эффекта проскальзывания фазы.

Поставленные цели охватывают широкий круг явлений в нанообъектах, физика которых определяется квантовой механикой с одной стороны, и в то же время, они имеют приложения в квантовом компьютеринге, квантовой электронике и метрологии. По этой причине **тема диссертационной работы Астафьева О.В. актуальна** и представляет первостепенный интерес для дальнейших фундаментальных исследований и прикладных работ в области сверхпроводящей квантовой электроники.

Структура и содержание диссертации

Диссертация Астафьева О.В. включает введение, пять глав, заключение, список сокращений, списки авторских публикаций и цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 432 страниц, которые включают 126 рисунков и библиографию из 399 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели исследования, ставятся задачи, на решение которых была направлена защищаемая работа, обосновываются новизна и практическая ценность полученных результатов, описывается методология и методы исследования, приводятся формулировки положений, выносимых на защиту.

Первая глава является оригинальной, она посвящена исследованию электронного транспорта в квантовых точках (QD) в двумерном газе галлий-арсенидных гетероструктур при воздействии дальнего инфракрасного и терагерцового излучения. Основным объектом исследования являются одноэлектронные транзисторы (SET) на двумерном электронном газе в гетероструктурах. С использованием SET как сверхчувствительного электрометра, исследованы свойства и внутренняя структура уровней квантовых точек в нулевом и в сильном магнитном поле. На основе таких структур были созданы детекторы одиночных фотонов, в которых использовался механизм одноэлектронной поляризации за счёт поглощения фотона. В детекторе первого типа используется полупроводниковая QD в сильном магнитном поле. Поглощение FIR-фотона через циклотронный резонанс в диапазоне длин волн $\lambda \sim 0.20$ мм приводит к перераспределению электронов между уровнями Ландау, что вызывает внутреннюю поляризацию квантовой точки, которая включает или

выключает резонансную проводимость через QD. Время жизни внутренней поляризации достаточно велико, что позволяет детектировать каждое событие поглощения индивидуально в виде отдельного переключения проводимости, реализующего детектирование одного FIR-фотона. Счетчик фотонов второго типа (в диапазоне частот 600 ± 120 ГГц) Детектор использует SET, образованный двумя связанными емкостным образом параллельными квантовыми точками. Барьер, разделяющий двойные QD в SET, позволяет возбужденному электромагнитным излучением электрону перебежать из одной QD в другую, но эффект кулоновской блокады препятствует процессу рекомбинации. Возникающая в результате долгоживущая фотоиндуцированная ионизация QD детектируется как изменение тока SET. Второй тип детектора обладает широким диапазоном варьирования длин волн и эффективности счета за счет изменения размеров QD и применяемых материалов.

Вторая глава также оригинальная, посвящена сверхпроводниковым квантовым системам. В ней продемонстрирована когерентная динамика системы из двух сверхпроводниковых зарядовых квантовых битов (кубитов), взаимодействующих электростатически через емкость. Эта динамика в частотном представлении показывает расщепление в точке вырождения, которое определяется энергией взаимодействия и демонстрирует запутанное состояние в этой области. Развитая технология позволила создать двухкубитный вентиль на двух связанных зарядовых кубитах, который продемонстрировал выполнение функционала контролируемой NOT (CNOT) операции. Реализована схема однократного считывания зарядового кубита. Схема включает в себя островок-ловушку, на которой накапливается избыточный заряд состояния $|1\rangle$ кубита. Этот заряд затем детектируется чувствительным электрометром – SET. Отдельный раздел посвящен исследованию механизмов декогеренции в зарядовом кубите. Показано, что времена когерентности сверхпроводникового зарядового кубита на аморфном диэлектрике определяются высокочастотным квантовым шумом и низкочастотным $1/f$ шумом. Высокочастотный шум имеет омическую природу – пропорционален частоте f . Низкочастотный $1/f$ шум имеет квадратичную зависимость от температуры. Обе зависимости (f и $1/f$) пересекаются на частоте, близкой к частотам температурных флуктуации, из чего следует, что они скорее всего имеют общую природу и хорошо описываются

двухуровневыми флуктуаторами в двухъямном потенциале с широким распределением высот барьера и случайным смещением. Продемонстрирована работа потоковых кубитов с двумя петлями. Такие кубиты потенциально устойчивы к глобальным флуктуациям магнитного поля благодаря внутренней симметрии. Выполнена систематизация режимов работы потоковых кубитов с целью оптимизации их свойств: энгармонизма, чувствительности к потоковым и зарядовым флуктуациям.

Третья глава посвящена новому направлению в физике – квантовой оптике на сверхпроводниковых квантовых системах. Впервые экспериментально продемонстрированы несколько физических эффектов: когерентная связь потокового кубита с резонатором; лазерный эффект на одиночном искусственном атоме, когда инверсная заселённость осуществляется через имплементированный процесс джозефсоновского квазичастичного цикла; сильная связь одиночного атома с одномерной копланарной линией – работа, открывающая целое направление экспериментальной реализации большого класса эффектов квантовой оптики на чипе; прямая спектроскопия трёхуровневой квантовой системы по рассеянию электромагнитной волны на искусственном атоме, резонансная флуоресценция на одиночном искусственном атоме с сильной связью к открытому пространству, продемонстрирован триплет резонансной флуоресценции (Mollow triplet) на одиночном атоме в открытом пространстве; реализован эффект электромагнитно индуцированной прозрачности на одиночном искусственном трёхуровневом атоме в открытом одномерном пространстве; продемонстрирован минимальный квантовый усилитель и электромагнитно-индуцированная прозрачность на одиночном атоме. Продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов по требованию с высокой эффективностью в СВЧ диапазоне. Показан новый эффект квантовой оптики – квантовое смешивание волн (КСВ) – развитие и предельный случай четырёхволнового смешения, когда в качестве нелинейного элемента выступает одиночная квантовая система.

Четвертая глава, квантовая акустика, является непосредственным развитием квантовой оптики. Принципиальное отличие состоит в том, что фотон заменяется на фонон, а скорость звука в средах на пять порядков меньше, чем скорость света, соответственно потенциально есть возможность уменьшения

размеров систем. С другой стороны, изготовление акустических систем в квантовом режиме требует сложной технологии, так как длина волны на частоте 3 ГГц, например, составляет 1 мкм. 1. Была разработана технология и изготовлены подвешенные металлические мостики с размерами от нескольких микрон до 0.6 мкм в длину. Такие мостики имеют резонансные частоты механических осцилляций от десятков мегагерц до 0,77 ГГц. Были изучены различные физические свойства таких мостиков, их поведение без магнитных полей и в сильных магнитных полях. Разработана технология изготовления акустических резонаторов на поверхностных волнах (ПАВ) на частотах 3 ГГц. Впервые реализована сильная связь между акустическим резонатором ПАВ и сверхпроводниковой квантовой системой. Продемонстрирован квантовый режим – связь между двухуровневой системой и резонатором с одним фотоном. Реализован фононный кристалл на поверхностных акустических волнах в квантовом режиме. Продемонстрированы моды фононного кристалла на периодической системе встречно-штыревых преобразователей на поверхности пьезоэлектрика (кристалл кварца).

Наконец, **пятая глава** посвящена исследованию одного из последних оставшихся нереализованным эффектов фундаментальной сверхпроводимости – когерентного квантового проскальзывания фазы (CQPS – Coherent Quantum Phase Slip). Продемонстрирован эффект квантового проскальзывания фазы в сверхпроводниковой нанопроволоке. Эффект наблюдается как суперпозиция двух квантов потока в сверхпроводящем колечке с нанопроволокой. Такая система представляет из себя кубит на двух состояниях в базисе квантов магнитного потока. Показана когерентная динамика и измерены времена когерентности. На основании поведения кубитов сделаны выводы о механизмах декогеренции в CQPS кубитах. Продемонстрирована интерференция двух амплитуд CQPS. Амплитуды складываются с учётом разности фаз, возникающих из-за наведённого заряда на металлическом островке между электродами. Этот эффект известен как эффект Ааронова-Кашера, и он дуален эффекту Ааронова-Бома. Реализованное устройство, в свою очередь, дуально СКВИД-у (SQUID) и названо ЗКВИД (CQUID). Продемонстрирован нестационарный CQPS эффект. Эффект проявляется в виде токовых ступенек на вольт-амперных характеристиках при измерении транспорта через проволочку. Этот эффект

имеет большое значение для метрологии, так как позволяет замкнуть метрологический треугольник квантовым стандартом тока наряду с существующими квантовыми стандартами напряжения и сопротивления.

В разделе Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые не вызывают сомнений и возражений.

Наиболее важными и новыми результатами диссертации являются следующие:

- впервые продемонстрировано детектирование одиночных фотонов в дальнем инфракрасном диапазоне на циклотронном резонансе в сильных магнитных полях на квантовых точках в гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As;
- впервые продемонстрировано детектирование одиночных фотонов на плазменном резонансе в квантовой точке на двумерном электронном газе;
- впервые продемонстрирована когерентная связь в системе из двух взаимодействующих кубитов;
- впервые продемонстрирован CNOT вентиль на двух взаимодействующих кубитах;
- впервые реализовано однократное вычитывание (single-shot readout) состояния сверхпроводникового зарядового кубита;
- впервые исследованы времена когерентности сверхпроводниковых зарядовых кубитов и механизмы декогерентности;
- впервые реализован лазерный эффект на одиночном искусственном атоме;
- впервые экспериментально показана когерентная (сильная) связь потокового кубита с резонатором;
- впервые реализована физически сильная связь искусственного атома с одномерным открытым пространством - копланарной линией;
- целый ряд фундаментальных явлений квантовой оптики впервые продемонстрирован на искусственном атоме в открытом одномерном пространстве;

- впервые реализован и продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов по требованию с высокой эффективностью. Источник работает в СВЧ диапазоне;
- впервые продемонстрирована сильная связь сверхпроводникового кубита с резонатором на поверхностных акустических волнах;
- впервые реализован эффект квантового проскальзывания фазы посредством суперпозиции квантов магнитного потока через нанопроволоку. Эффект продемонстрирован методами квантовой оптики – по спектроскопии двухуровневой системы с туннельным элементом для квантов магнитного потока;
- впервые показана интерференция амплитуд проскальзывания фаз через две нанопроволоки (эффект Ааронова-Кашера). Эффект дуальный интерференции амплитуд туннелирования куперовских пар в СКВИД-е;
- впервые продемонстрирован фундаментальный эффект нестационарного проскальзывания фазы под действием микроволнового излучения. Это фундаментальный эффект физики, и он полностью дуален нестационарному эффекту Джозефсона и имеет важное значение для квантовой метрологии.

Научная новизна работы не нуждается в обосновании. Экспертиза, выполненная рецензентами 6 статей в Nature, 5 статей в Nature Communications, Nature Physics и др. семейства Nature, 1 статьи в Science, 9 статей в Physical Review Letters, 21 статьи в Physical Review (A,B,Appl), 9 статей в Applied Physics Letters, и более 4600 цитирований по SCOPUS убедительно свидетельствуют об новизне и оригинальности полученных диссертантом результатов.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов определяются использованием современного научного оборудования, согласованностью результатов измерений, полученных разными физическими методами, выполнением тестовых измерений, теоретическим обоснованием и моделированием результатов измерений, хорошо согласующимся с экспериментальными данными, а также сопоставлением и согласием полученных результатов с литературными данными.

Научная и практическая значимость работы заключается в постановке задачи и реализации квантовой оптики на искусственных квантовых системах,

которая открывает возможности реализации приборов нового типа, принцип работы которых основан на законах квантовой механики. Эти работы имеют как фундаментальное, так и прикладное значение. На основе представленных работ может быть изготовлен детектор фотонов, работающий в терагерцовом диапазоне. Результаты исследования сверхпроводниковых кубитов легли в основу увеличения времён когерентности. Это важно для разработки практических квантово-вычислительных устройств. Впервые продемонстрированная двухкубитная связь, а также вентиль CNOT, показали принципиальную возможность масштабирования сверхпроводниковых квантовых цепей. Продемонстрированная серия явлений из квантовой оптики на искусственных квантовых системах важна как с фундаментальной точки зрения, так и для реализации новых устройств квантовой электроники на чипе. Квантовая акустика является расширением квантовой оптики на гиперзвуковой диапазон. Впервые реализованный эффект нестационарного когерентного квантового проскальзывания фазы чрезвычайно важен для квантовой метрологии. Это последний недостающий элемент для того, чтобы замкнуть электрический метрологический треугольник, состоящий из стандарта напряжения на нестационарном эффекте Джозефсона, стандарта сопротивления на квантовом эффекте Холла и стандарта тока.

Замечания по диссертации:

1. в различных экспериментах, описанных в диссертации, используются похожие методы изготовления устройств. Мне представляется, что было бы полезно вынести описание общих нанотехнологических приемов, а также основных методов измерения сверхпроводниковых квантовых устройств в отдельный раздел. Это бы позволило разгрузить и упростить дальнейшее изложение и избежать повторов. Раздел по технологии изготовления и методам измерений помог бы систематизировать отличия квантовой оптики на чипе в СВЧ диапазоне от традиционной квантовой оптики в оптическом диапазоне на естественных атомах;
2. в главе 2 в разделе 2.4 изучается низкочастотный $1/f$ шум и высокочастотный омический шум пропорциональный частоте f . Обнаружено, что спектральные плотности f -шума и продолженного $1/f$ шума пересекаются на частоте, соответствующей термическим флуктуациям $k_B T/h$. Это интересный эффект,

однако остаётся открытым вопрос: является ли этот эффект свойством конкретного диэлектрика, используемого в данном устройстве, или он имеет более универсальную природу? Этот вопрос актуален в свете усилий по увеличению времени когерентности кубитов в квантовых процессорах;

3. многие проблемы полупроводниковой электроники были решены переходом к эпитаксиальной технологии изготовления микропроцессоров; поликристаллическими или даже аморфными делаются только управляющие затворы – потенциальные электроды, через которые не течет ток. Как Вы думаете, может ли применение эпитаксиальной технологии изготовления кубитов быть одним из путей увеличения времени декогеренции?
4. на стр. 146 обсуждаются возможные направления совершенствования систем на потоковых кубитах, одно из которых – внедрение материалов с высокой кинетической индуктивностью, например, нестехиометрических нитридов TiN, NbN, MoN и нестехиометрического оксида индия InO_x (см. также стр. 326 и стр. 339-340). Причем для кубитов на проскальзывании фазы желательно, чтобы они были с максимальным разупорядоченными и демонстрировали переход сверхпроводник-изолятор. Возникает вопрос, не сопровождается ли применение нестехиометрических материалов опасностью повышения уровня шума и уменьшения времени декогеренции из-за наличия двухуровневых флуктуаторов, присущих разупорядоченным системам;
5. в главе 5 используется понятие дуальности между когерентным квантовым проскальзыванием фаз (CQPS) и джозефсоновским эффектом. Использование термина дуальности, действительно, полезно для описания физики CQPS, однако на микроскопическом уровне дуальность между элементарным зарядом в сверхпроводнике и квантом магнитного потока нарушается. Куперовская пара состоит из двух квазичастиц, связанных конечной энергией, а квант магнитного потока не разбивается на составляющие. Было бы полезно пояснить границы применимости этого термина;
6. стр. 129 – не размечены фрагменты рисунка 2.20 – (a), (b), вставка, но догадаться можно;
7. стр. 132, рисунок 2.21 – отсутствует фрагмент (b), фрагмент (a) не обозначен.

8. стр. 138, рисунок 2.24 – потенциал IV не описан в подписи к рисунку (другие описаны), в основном тексте описание есть;
9. стр. 149: Глава 2. ... «Они **были** показаны в главе «Квантовая оптика на сверхпроводниковых квантовых системах»» - в прошедшем времени, тогда как «Квантовая оптика на сверхпроводниковых квантовых системах» - **следующая** Глава 3;
10. стр. 153, «**Проводимость** перехода ~ 200 кОм не имеет существенного значения для несмещенного перехода». Нестыковка размерностей;
11. По тексту встречаются англицизмы типа эластичное/неэластичное рассеяние (упругое/неупругое по-русски), порядок слов в предложениях и т.п.

Приведенные замечания, однако, не снижают очевидной высокой оценки представленной диссертации и квалификации ее автора. В целом, следует отметить, что диссертационная работа Астафьева О.В. демонстрирует высочайшую квалификацию автора как физика-экспериментатора в равной мере владеющего экспериментальным оборудованием и методами его использования, а также знанием и умением моделирования полученных результатов и анализом физических причин и эффектов, лежащих в основе выбора или построения модели и ее проработки. Это существенно повышает достоверность, убедительность и значимость полученных результатов, а также дает инструмент для предсказательного моделирования – численного эксперимента, который может значительно сократить время и материальные затраты на планирование дальнейшего эксперимента.

Полученные результаты представляют большой интерес и могут быть рекомендованы к использованию в ИФТТ РАН (г. Черноголовка), Физико-техническом институте ФИЦ КазНЦ РАН (г. Казань), МГТУ им. Н. Э. Баумана, Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС», Казанском федеральном университете, Московском государственном университете, ВНИИА им. Н.Л. Духова, Институте физики микроструктур РАН (г. Нижний Новгород), и в ряде других научных центров, занимающихся исследованиями физики сверхпроводящих гетероструктур.

Основные результаты диссертации опубликованы в 81 статье в самых высокорейтинговых международных научных журналах, входящих в перечень

ВАК, а также докладывались на 99 российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает её основное содержание.

Диссертация Астафьева О.В. представляет собой развитие нового направления физики – квантовой оптики на искусственных квантовых системах: сверхпроводниковых квантовых схемах и квантовых точках на основе полупроводниковых гетероструктур АЗВ5. По своему содержанию, объему, новизне, достоверности, и практической значимости полученных результатов диссертация на тему «Квантовая оптика на искусственных квантовых системах» полностью удовлетворяет требованиям, установленным "Положением о порядке присуждения степеней" (пункты 9-11,13,14), утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, и Паспорту специальности 1.3.8, а ее автор, Астафьев Олег Владимирович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Я, Тагиров Ленар Рафгатович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02), и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук (01.04.02 – теоретическая физика),
профессор, ведущий научный сотрудник
лаборатории нелинейной оптики
Казанского физико-технического
института им. Е.К. Завойского –
обособленного структурного
подразделения Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Федеральный
исследовательский центр «Казанский
научный центр Российской академии наук»
Тагиров Ленар Рафгатович

Адрес: 420029, г. Казань,
ул. Сибирский тракт, д.10/7,
тел. (843)2319074
e-mail: ltagirov@mail.ru


06.03.2024



