

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Объединённого института ядерных
исследований,

доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН



Г.В. Трубников

«21» февраля 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию 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».

Достижения в нанотехнологии, а также развитие экспериментальных методов сегодня позволяют контролировать одиночные кванты и манипулировать квантовыми состояниями в электронных схемах на чипе. Это стало возможно с появлением технологии изготовления структур субмикронного размера, в которых квант элементарного заряда (или магнитного потока) существенно воздействует на систему и изменяет её энергию на величину, значительно превышающую тепловые флуктуации.

Искусственные квантовые системы, спроектированные с заданными свойствами и изготовленные методами современных нанотехнологий, открывают новые возможности в изучении фундаментальных физических эффектов, а также в создании приборов нового типа. Благодаря легко достижимой сильной связи в таких системах, а также высокой степени контроля с помощью электрических сигналов (включая контроль квантовых состояний), можно реализовывать режимы работы, а также наблюдать явления, ранее недостижимые в обычной квантовой оптике на естественных атомах. Это открывает возможность изучения новых явлений фундаментальной физики, а также реализации качественно новых устройств с новыми возможностями.

Диссертация О. В. Астафьева посвящена исследованию квантовой оптики на искусственных квантовых системах, исследованию фундаментальных явлений и реализации новых эффектов с перспективой разработки новых устройств. В качестве платформы для реализации в работе используются устройства на чипе, изготовленные методами

нанотехнологии, а именно, квантовые точки на основе двумерного электронного газа в гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As и сверхпроводниковые квантовые структуры. Квантовые точки исследуются в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах. Тема представленной диссертации, несомненно, **актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.**

Диссертация состоит из Введения, пяти оригинальных глав и Заключения, она основана на 86 работах, опубликованных в ведущих международных научных журналах, которые включены в перечень ВАК.

Во введении представлен краткий анализ направлений и актуальности исследований квантовой оптики на искусственных квантовых системах, определены цели и методы выполненных в диссертации исследований, а также их научная и практическая значимость; перечислены положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена транспортным свойствам в квантовых точках в двумерном газе галлий-арсенидных гетероструктур под действием дальнего инфракрасного и терагерцового излучения. В ней продемонстрировано, что одноэлектронные транзисторы (SET) на двумерном электронном газе в гетероструктурах являются мощным инструментом для изучения свойств квантовых точек. В частности, с помощью SET были исследованы свойства и внутренняя структура квантовых точек с числом электронов в несколько сотен в сильном магнитном поле и в нулевом магнитном поле. На основе таких структур диссертантом с коллегами были созданы детекторы одиночных фотонов и исследованы две схемы однофотонного детектирования в диапазонах FIR и SMMW, основанные на разных принципах поглощения и поляризации. В детекторе первого типа использовалась полупроводниковая квантовая точка в сильном магнитном поле. Индуцированный FIR перенос электронов вызывает внутреннюю поляризацию квантовой точки, которая включает или выключает ее резонансную проводимость. В детекторах этого типа спектральная полоса настраивается магнитным полем, но диапазон настройки не очень велик. На практике, однако, диапазон длин волн может быть расширен за счет использования электронного газа с различными значениями плотности электронов. Диссертантом был также разработан счетчик фотонов, работающий в микроволновом диапазоне. Такой счетчик использует одноэлектронный транзистор (SET), образованный двумя емкостным образом связанными параллельными квантовыми точками. Возникающая в результате долгоживущая фотоиндуцированная ионизация квантовой точки детектируется как изменение тока SET.

Вторая глава посвящена изучению различных свойств сверхпроводниковых квантовых систем, а также некоторым важным фундаментальным физическим аспектам сверхпроводниковых кубитов и их взаимодействия. В этой главе было показано, что система из двух сверхпроводниковых зарядовых кубитов, взаимодействующих электростатически через емкость, демонстрирует когерентную временную динамику. Эта динамика в частотном представлении показывает расщепление, которое определяется энергией взаимодействия. Был

продемонстрирован двухкубитный вентиль CNOT на двух связанных зарядовых кубитах. Реализована схема однократного считывания зарядового кубита. Была также продемонстрирована работа потоковых кубитов с двумя петлями. Такие кубиты потенциально устойчивы к глобальным флуктуациям магнитного поля благодаря внутренней симметрии. В этой главе диссертантом были также систематизированы режимы работы потоковых кубитов с целью оптимизации их свойств.

Третья глава настоящей диссертации посвящена новому интересному направлению в физике – квантовой оптике на сверхпроводниковых квантовых системах. В рамках этой главы диссертантом описан ряд впервые экспериментально продемонстрированных физических эффектов. В частности, была показана когерентная связь потокового кубита с резонатором и лазерный эффект на одиночном искусственном атоме, где инверсная заселённость осуществляется через имплементированный процесс джозефсоновского квазичастичного цикла. Была продемонстрирована сильная связь одиночного атома с открытым пространством. Данная работа открыла новое направление в экспериментальной реализации большого класса эффектов квантовой оптики на чипе. Также был продемонстрирован целый ряд уникальных эффектов: прямая спектроскопия трёхуровневой квантовой системы по рассеянию электромагнитной волны на искусственном атоме, излучение спонтанной релаксации на одиночном трёхуровневом искусственном атоме в открытом одномерном пространстве, эффект резонансной флуоресценции на одиночном искусственном атоме. Был реализован эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности на одиночном искусственном трёхуровневом атоме в открытом одномерном пространстве и минимальный (предельный) квантовый усилитель, состоящий из одиночного искусственного атома, сильно связанного с открытым пространством. Охарактеризована временная динамика упругого и неупругого рассеяния электромагнитной волны на искусственном атоме по излучению из атома. Продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов с высокой эффективностью в СВЧ диапазоне. Продемонстрирован также новый эффект квантовой оптики – квантовое смещение волн (КСВ) на одиночном искусственном атоме и реализованы различные режимы квантового смещения – непрерывный и импульсный.

Четвёртая глава посвящена квантовой акустике. В рамках этой главы была разработана технология изготовления подвешенных металлических мостиков с размерами в несколько микрон в длину. Были изучены различные физические свойства таких мостиков, их поведение как без магнитных полей, так и в сильных магнитных полях. Разработана технология изготовления акустических резонаторов на поверхностных волнах на частоте 3 ГГц. Впервые реализована сильная связь между акустическим резонатором ПАВ и сверхпроводниковой квантовой системой. Реализован фононный кристалл на поверхностных акустических волнах в квантовом режиме. Продемонстрированы моды фононного кристалла на периодической системе встречно-штыревых преобразователей на поверхности пьезоэлектрика.

В пятой главе были исследованы квантовые системы на основе квантового проскальзывания фазы (CQPS) в сверхпроводниковых нанопроволочках. Эффект наблюдается как суперпозиция двух квантов потока в сверхпроводящем колечке с нанопроволочкой. Была продемонстрирована универсальность эффекта в различных материалах. Такая система представляет из себя кубит на двух состояниях в базисе квантов магнитного потока. Были показаны когерентные осцилляции и измерены времена когерентности. На основании поведения кубитов сделаны выводы о механизмах декогеренции в CQPS кубитах. Была также продемонстрирована интерференция двух амплитуд CQPS. Амплитуды складываются с учётом разности фаз, возникающей из-за наведённого заряда на металлическом островке между электродами. Был также продемонстрирован нестационарный CQPS эффект. Эффект в точности дуален нестационарному джозефсоновскому эффекту и проявляется в виде токовых ступенек на вольт-амперных характеристиках при измерении транспорта через проволочку. Этот эффект имеет большое значение для метрологии, так как может позволить замкнуть метрологический треугольник. Недостающее звено в нем – квантовый стандарт тока, наряду с существующими квантовыми стандартами напряжения и сопротивления.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в работе были успешно исследованы различные свойства квантовой оптики на искусственных квантовых системах, а также предложен ряд приборов и устройств на ее основе. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано на прекрасном владении диссертантом современными теоретическими и экспериментальными методами квантовой оптики, а также на детальном понимании проблем в текущих экспериментальных исследованиях в этой области.

В качестве **замечаний** можно отметить следующие моменты:

1. На стр. 369 отмечается, что «...при условии резонанса туннелирование потока синхронизируется с микроволновым сигналом и формируется ступенька тока». Однако формирование ступеньки Шапиро напряжения, как и ступеньки тока - не есть резонансное явление! Это именно явление синхронизации, или как иногда говорят, захват частоты.
2. Вызывают вопросы определенные высказывания типа на стр. 76 «Практический квантовый компьютер, если он будет создан...». Но ведь уже проводятся определенные расчеты на квантовых компьютерах на Ю-Тюбе! На стр. 322 вызывает вопросы слово «последних» в утверждении «...одного из последних оставшихся нереализованным эффектов фундаментальной сверхпроводимости – когерентного квантового проскальзывания фазы». Разве число эффектов ограничено? Было бы полезно обосновать такие сомнения и утверждения.

3. В связи с утверждением о полной дуальности джозефсоновских систем и систем с проскальзыванием фазы возникают вопросы о его детальном обосновании. Основано ли оно только на использовании в работах диссертанта единых уравнений для описания эффектов или имеет другое обоснование? В частности, возможно ли экспериментальное наблюдение лестничных структур на ВАХ в системах с проскальзыванием фазы? Возможна ли реализация в системах с проскальзыванием фазы эффектов, наблюдаемых в системах связанных джозефсоновских переходов?
4. Спектральные линии кубита в зависимости от внешнего магнитного потока показаны на рис. 26, а не на рисунке 25, как указано в реферате. В тексте диссертации имеется ряд опечаток грамматического характера.

Сделанные замечания имеют характер пожеланий или относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

В целом диссертация выполнена и изложена на самом высоком уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в экспериментальные исследования

Практическая значимость работы связана с развитием теоретических моделей и подходов, предсказанием новых свойств гибридных структур, имеющих перспективу использования в качестве элементов криоэлектроники.

Результаты могут быть использованы и развиты в ОИЯИ г. Дубна, ИФТТ РАН и ИПТМ РАН г. Черноголовка, ИРЭ РАН, г. Москва, ФИ РАН г. Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях.

По своей **актуальности**, научной **новизне**, объёму выполненных исследований и **практической** значимости полученных результатов диссертационная работа «Квантовая оптика на искусственных квантовых системах», соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор – Астафьев Олег Владимирович - достоин присуждения искомой степени по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Работа заслушана и поддержана на семинаре НЭО НИКС ЛНФ ОИЯИ 19.01.2024.

Отзыв составили:

Главный научный сотрудник

Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка

Объединенного института ядерных исследований,

член-корреспондент РАН, профессор



д.ф.-м.н. В.Л. Аксенов

Сведения об Аксенове Викторе Лазаревиче
Доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8,
член-корреспондент РАН, профессор,
Главный научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка
Объединенного института ядерных исследований
Адрес: 141980 Россия, Дубна МО, ул. Жолио-Кюри, д.6.
Телефон: 8(49621) 65796
E-мейл: aksenov@nf.jinr.ru

Ведущий научный сотрудник
Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований,
Доктор физико-математических наук, профессор



д.ф.-м.н. Ю. М. Шукринов

Сведения о Шукринове Юрие Маджнуновиче

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.02 Теоретическая физика
Ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединенного института ядерных исследований
Адрес: 141980 Россия, Дубна МО, ул. Жолио-Кюри, д.6.
Телефон: 8(49621) 63844
E-мейл: shukrinv@theor.jinr.ru

Главный ученый секретарь ОИЯИ



С. Н. Неделько