Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

На правах рукописи

Астафьев Олег Владимирович

КВАНТОВАЯ ОПТИКА НА ИСКУССТВЕННЫХ КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Черноголовка 2023

Работа выполнена в Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Официальные оппоненты: Тагиров Ленар Рафгатович, доктор физико-математических наук, профессор Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» ведущий научный сотрудник Кулик Сергей Павлович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», профессор кафедры квантовой электроники, научный руководитель Центра квантовых технологий физического факультета Панкратов Андрей Леонидович, доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, ведущий научный сотрудник отдела терагерцовой спектрометрии Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка

Защита состоится «____» _____ 2023 г. в_14_часов <u>30</u> минут на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), расположенном по адресу: 142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте диссертационного совета при ИФТТ РАН по ссылке: http://www.issp.ac.ru/main/dis-council.html Автореферат разослан « _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02), Доктор физико-математических наук

Talf

Гаврилов С. С. © Астафьев О. В., 2023 © ИФТТ РАН, 2023

Актуальность темы

Достижения в нанотехнологии, а также развитие экспериментальных контролировать методов сегодня позволяют 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. Уменьшить величину тепловых флуктуаций в таких структурах в свою очередь стало возможно с помощью другого достижения – техники охлаждения до очень низких температур (0,1 – 0,01 К), появившейся благодаря развитию рефрижераторов растворения 3 Не в 4 Не.

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 физически сильной связи в таких системах, а также высокой степени контроля (включая контроль квантовых состояний) с помощью электрических сигналов, можно реализовывать режимы работы, а также наблюдать явления, ранее недостижимые в обычной квантовой оптике на естественных атомах. Это открывает возможность изучения фундаментальной физики, а также реализацию качественно новых устройств с новыми возможностями. Наиболее известный пример – квантовые процессоры, которые потенциально смогут решать определённый круг задач экспоненциально быстро. И хотя до сих пор неясно, возможно ли достижение квантового превосходства на практике, прогресс в интеграции полностью контролируемых квантовых схем позволяет развивать новые компетенции и технологии. Другие применения таких устройств, более очевидные уже сейчас и, несомненно, перспективные, детекторы нового типа и квантовая метрология на основе устройств, работающих на принципах квантовой механики.

В настоящее время квантовые технологии привлекают значительный интерес, который подтверждается увеличивающимся количеством научных публикаций и научных групп, работающих в этом направлении. В последнее время получил распространение термин «Вторая квантовая революция», который предполагает, что исследования в этой области должны привести к созданию приборов нового типа на основе когерентных квантовых систем, которые изменят нашу повседневную жизнь.

Среди различных подходов квантовые приборы на чипе, несомненно, обладают рядом преимуществ, так как представляют из себя полностью контролируемые устройства с заранее известными характеристиками.

Степень проработанности проблем

В последнее время достигнут значительный прогресс в реализации устройств на основе контроля единичных квантов и шире – квантовых состояний. Определённый вклад в это был внесён, в частности, работами, выносимыми на защиту. Диссертация основывается на пионерских работах в области сверхпроводниковых квантовых схем и квантовых точек. Квантовые устройства на чипе бурно развиваются с начала 2000-х, и значительный прогресс стал особенно заметен в последнее время. Тем не менее сейчас всё ещё остаётся большое поле для научных исследований, в том числе, фундаментальных явлений. Автор продолжает работу по большинству представленных к защите направлений, в том числе, в коллективе молодых учёных руководимой им лаборатории.

<u>Цели и задачи</u>

Настоящая диссертация в широком смысле представляет развитие нового направления физики – квантовой оптики на искусственных квантовых системах. Целью работы является исследование физики таких систем, исследование фундаментальных явлений и реализация 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. Более подробно цели сформулированы следующим образом:

Изучение физики квантовых точек на основе двумерного электронного газа в гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As в сильных магнитных полях и без магнитного поля. Исследование электронного транспорта в таких одноэлектронного Исследование системах В режиме транзистора. взаимодействия их с электромагнитным излучением. Разработка детектора фотонов на частоте циклотронного резонанса в дальнем одиночных инфракрасном диапазоне. Разработка детектора одиночных фотонов на основе квантовых точек на частоте плазменного резонанса квантовой точки (субтерагерцовый диапазон).

• Разработка сверхпроводниковых квантовых битов. Исследование физических свойств сверхпроводниковых квантовых устройств на чипе. Исследование механизмов декогеренции. Реализация однократного считывания кубитов. Первая демонстрация когерентного взаимодействия двух связанных сверхпроводниковых кубитов. Реализация первого двухкубитного вентиля СNOT. Разработка новых схем сверхпроводниковых кубитов.

• Исследование взаимодействия СВЧ излучения с искусственными атомами (ИА) на основе сверхпроводниковых квантовых систем. Реализация физически сильной связи ИА с полем резонаторов, а также серии фундаментальных физических эффектов на наих. Реализация физически сильной связи ИА с открытым одномерным пространством копланарной линии на чипе. Демонстрация различных физических явлений квантовой оптики на одиночном ИА. Такие явления: резонансная флюоресценция, спонтанная эмиссия, электромагнитно-индуцированная прозрачность, квантовый усилитель, и т.д. Реализация высокоэффективного перестраиваемого источника фотонов по требованию.

• Разработка резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в пьезоэлектриках в СВЧ диапазоне. Реализация и демонстрация сильной связи между ИА и ПАВ резонатором. Демонстрация квантового режима резонатора на ПАВ. Исследование спектра ПАВ резонатора с помощью ИА. Реализация квантово-оптических эффектов на акустических системах.

• Демонстрация когерентного квантового эффекта проскальзывания фазы (CQPS – Coherent Quantum Phase Slip effect) в нанопроволочках. Исследование физики CQPS. Демонстрация суперпозиции квантов магнитного потока в сверхпроводящем колечке с нанопроволочкой. Наблюдение эффекта посредством спектроскопии CQPS кубита. Демонстрация интерференции двух амплитуд проскальзывания фазы – эффект Ааронова-Кашера. Демонстрация нестационарного эффекта проскальзывания фазы: наблюдение перевёрнутых ступенек Шапиро в ток-фазовых характеристиках.

Научная новизна

Были получены следующие результаты:

• 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 СNOT 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 акустическим волнах.

• Впервые реализован эффект квантового проскальзывания фазы посредством суперпозиции квантов магнитного потока через нанопроволочку. Эффект продемонстрирован методами квантовой оптики – по спектроскопии двухуровневой системы с туннельным элементом для квантов магнитного потока.

• Впервые показана интерференция амплитуд проскальзывания фаз через две нанопроволочки (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.

Теоретическая и практическая значимость работы

Направление квантовой оптики на искусственных квантовых системах открывает возможность реализации приборов нового типа, в основе которых лежат законы квантовой механики. 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 улучшения 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.

• Продемонстрированная рекордная сила связи с открытым пространством открывает практическую возможность реализации квантовых вычислений на распространяющихся фотонах.

• Квантовая акустика важна как с фундаментальной точки зрения (квантовая оптика может быть теперь реализована в акустических системах), так и с практической. Она открывает возможность реализации более компактных элементов для квантовых устройств, например, для квантовых процессоров. Направление может быть также развито в направлении высокочувствительных сенсоров.

реализованный эффект Впервые проскальзывания фазы В нанопроволочках последних нереализованных эффектов ОДИН ИЗ фундаментальной сверхпроводимости. Это зрения важно С точки фундаментальной физики.

Отдельное место занимает эффект нестационарного когерентного квантового проскальзывания фазы. Он чрезвычайно важен для квантовой метрологии. Это последний недостающий элемент для того, чтобы замкнуть метрологический треугольник, состоящий электрический ИЗ стандарта напряжения на нестационарном эффекте Джозефсона, стандарта сопротивления эффекте Холла и стандарта тока. Последний является на квантовом недостающим элементом и будет базироваться на продемонстрированном эффекте нестационарного когерентного квантового проскальзывания фазы. Этот эффект был предсказан 30 лет тому назад.

В работах проведён анализ исследуемых эффектов. Выведены аналитические выражения в тех эффектах, где это практически возможно.

Методология и методы исследования

Структуры измеряемых объектов изготавливались при помощи методов современной нанотехнологии, одним из ключевых элементов которой является электронный литограф. Размер наименьших элементов достигает 20 нм. Это нанопроволочки экспериментов когерентному ДЛЯ по квантовому проскальзыванию фазы, а также минимальные джозефсоновские переходы в Характерные других экспериментах. размеры остальных элементов варьировались от 100 нм (типичный размер джозефсоновских переходов) до сотен микрометров. Джозефсоновские переходы формируются методом трёхуглового напыления.

Все экспериментальные работы выполняются при низких температурах (0,01 – 0,1 К). Образец располагается в рефрижераторе растворения ³He в ⁴He. Исследуется либо постоянный ток, либо отклик (излучение) электромагнитных волн СВЧ или дальнего ИК диапазона от наноструктур. Так как взаимодействие, как правило, ограничено низким уровнем сигнала – один фотон испускается за время релаксации либо двухуровневой системы, либо резонатора – исходящая мощность электромагнитных волн чрезвычайно низкая. Слабое

электромагнитное излучение усиливается системой малошумящих усилителей, в том числе криогенных. Затем детектируется либо эластичное рассеяние на частотах возбуждения системы (с помощью анализаторов цепей), либо неэластичное с изменением частоты (с помощью спектрального анализатора). В последних экспериментах активно использовались быстрые оцифровщики сигналов и обработка сигналов в реальном времени.

Результаты экспериментов в СВЧ диапазоне по прохождению или излучению анализируются и сравниваются с вычислениями, полученными решением квантового кинетического уравнения либо аналитически, где возможно, либо численно, если аналитическое решение получить затруднительно.

Положения, выносимые на защиту

1. Квантовые точки микронного размера, сформированные металлическими электродами на двумерном электронном газе в гетероструктурах

GaAs/Al_xGa_{1-x}As, работают как детекторы фотонов в дальнем инфракрасном и терагерцовом диапазонах. В сильном магнитном поле одиночный фотон на частоте циклотронного резонанса приводит к внутренней поляризации квантовой точки, что радикально меняет резонансный ток в режиме одноэлектронного транзистора. Также показано, что в двойной квантовой точке в нулевом магнитном поле в специально подобранном режиме, одиночные фотоны можно детектировать на частотах порядка 0,5 ТГц.

2. Система двух сверхпроводниковых кубитов, ИЗ зарядовых взаимодействующих электростатически через емкость, демонстрирует когерентную временную динамику. Эта динамика в частотном представлении (после преобразования Фурье) показывает расщепление, которое определяется энергией взаимодействия. Такую систему можно использовать для демонстрации двухкубитного вентиля CNOT.

3. Времена когерентности сверхпроводникового зарядового кубита на аморфном диэлектрике определяются высокочастотным квантовым шумом и

низкочастотным 1/f шумом. Высокочастотный шум имеет омическую природу – пропорционален частоте. Низкочастотный 1/f шум имеет квадратичную зависимость от температуры. Обе зависимости (f и 1/f) пересекаются на частоте, близкой к частотам температурных флуктуаций из чего следует, что они, вероятно, имеют связанную природу и хорошо описываются двухуровневыми флуктуаторами в двухъямном потенциале с распределением по высоте барьера и случайным смещением. Для измерения релаксации кубитов была впервые разработана и применена методика однократного считывания на одноэлектронных транзисторах.

4. Сделан значительный вклад в новое направление физики квантовой оптики на сверхпроводниковых квантовых системах: впервые экспериментально реализован большой спектр фундаментальных эффектов квантовой оптики на чипе в СВЧ диапазоне. Продемонстрирован лазерный эффект на одиночном Инверсная искусственном атоме. заселённость осуществляется через имплементированный процесс джозефсоновского квазичастичного цикла (JQP: Josephson Quasiparticle Cycle). Экспериментально продемонстрирована когерентная (сильная) связь потокового кубита с резонатором. Реализована физически сильная связь одиночного атома с открытым пространством (одномерной копланарной линией). Данная работа открыла целое направление экспериментальной реализации большого класса эффектов квантовой оптики на чипе. Продемонстрирован эффект резонансной флуоресценции на одиночном искусственном атоме с сильной связью к открытому пространству. Продемонстрирован триплет резонансной флуоресценции (Mollow triplet) на одиночном атоме в открытом пространстве. Показано эластичное и неэластичное рассеяние электромагнитной волны на одиночной квантовой системе на чипе. (предельный) Продемонстрирован минимальный квантовый усилитель, состоящий из одиночного искусственного атома, сильно связанного с открытым пространством. Продемонстрирована электромагнитно-индуцированная прозрачность на одиночном искусственном атоме в открытом пространстве. Охарактеризована временная динамика эластичного и неэластичного рассеяния

электромагнитной волны на искусственном атоме по излучению из атома. Продемонстрирована процедура восстановления корреляторов и неэластичных спектров по динамике когерентного излучения от искусственных атомов. Продемонстрирован лазерный эффект на одиночном атоме с копланарным накачкой. резонатором с оптической Продемонстрирована прямая спектроскопия трёхуровневой квантовой системы ПО рассеянию атоме. электромагнитной волны на искусственном Продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов по требованию с высокой эффективностью в СВЧ диапазоне.

5. Открыт новый фундаментальный эффект квантовой оптики – квантовое 4-ёх волновое смешение. Выявлены различные режимы квантового смешения волн. Показано наличие различных порядков смешения волн на одиночной квантовой системе и их свойства. Показана связь спектра квантового волнового смешения с фотонной статистикой. Экспериментально показано разложение гармонических Раби-осцилляций по порядкам волнового квантового смешения, соответствующего многофотонным процессам различных порядков.

6 наномостики Реализованы подвешенные c механическими резонансными частотами около 1 ГГц. Продемонстрирована сильная связь сверхпроводникового кубита с резонатором на поверхностных волнах. Продемонстрирован квантовый режим акустического резонатора С двухуровневой квантовой системой. Эксперимент закладывает основу для квантовой акустодинамики. Реализован фононный кристалл на поверхностных акустических волнах в квантовом режиме. Продемонстрированы моды фононного кристалла на периодической системе электродов встречно-штыревых преобразователей на поверхности пьезоэлектрика (кристалл кварца).

7. Впервые экспериментально продемонстрирован эффект когерентного квантового проскальзывания фазы посредством суперпозиции двух потоковых состояний в колечке с нанопроволочкой. Реализован кубит на эффекте квантового проскальзывания фазы. Изучены механизмы декогеренции в кубитах на квантовом проскальзывании фаз. Продемонстрирована универсальность

(независимость от материала) эффекта квантового проскальзывания фазы: эффект реализован в нанопроволочках из различных материалов: InO_x, TiN и NbN. Продемонстрирована интерференция двух амплитуд проскальзывания фаз. Эффект реализован на кубите с двумя короткими проволочками. Устройство представляет из себя дуальный аналог СКВИД-а. Продемонстрирован эффект нестационарного проскальзывания фазы под действием микроволнового излучения. Этот эффект представляет из себя фундаментальный эффект физики и физически в точности дуален нестационарному эффекту Джозефсона.

Степень достоверности и апробация результатов

Все представленные результаты опубликованы в рецензируемых журналах. Дополнительно в большинстве работ результаты имеют хорошее соответствие с аналитическими моделями или компьютерными симуляциями. Многие научные результаты являются пионерскими и в дальнейшем подтверждены и развиты независимыми исследованиями.

Результаты диссертации опубликованы в 81 статье, индексируемой в базах данных Web of Science/Scopus, и апробированы на 99 различных международных научных конференциях, рабочих совещаниях и семинарах. Количество приглашённых или пленарных докладов – 93.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Диссертация состоит из пяти глав, каждая из которых посвящена изучению квантовых явлений в различных наноструктурах и их взаимодействию с электромагнитным излучением, окружением или другими элементами на уровне единичных квантов.

Первая глава

Глава посвящена транспортным свойствам в квантовых точках в двумерном газе галлий-арсенидных гетероструктур под действием дальнего инфракрасного и терагерцового излучения [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Изучается ток через такую квантовую точку в сильных магнитных

полях, а также через двойную квантовую точку без магнитного поля. В таких структурах (микронного размера), сформированных отрицательно смещенными электродами на поверхности, можно контролировать единичные электроны, внутреннюю электронную структуру (распределение электронов внутри). На рисунке 1 показано изображение квантовой точки, полученное в электронном микроскопе. На рисунке 2 изображены уровни Ландау в сильном магнитном поле, а также формирование проводящих колец и ядра там, где уровни Ландау пересекают уровень Ферми – электроны на уровне Ферми проводят ток.



Рисунок 1 – СЭМ изображение металлических электродов на поверхности гетероструктуры.



Рисунок 2 – Возбуждение, индуцированное поглощением фотона на циклотронной частоте, и результирующая внутренняя поляризация QD. Один из двух возможных процессов возбуждения LL1↑ → LL2↑ → LL2↓ или LL1↓ → LL2↓. Оба процесса заканчиваются добавочным электроном на LL2↓ после фононной релаксации электрона и дырки.

Продемонстрировано, что в определённых условиях поглощение одного фотона на частоте циклотронного резонанса в сильном магнитном поле, а также на частоте плазменного резонанса без магнитного поля в двойных квантовых точках приводит к долгоживущей внутренней поляризации, что радикально меняет ток через квантовую точку и может быть легко задетектировано. Механизм возникновения поляризации показан на рисунке 2. Возбуждённая электрон-дырочная пара быстро отдаёт энергию решётке: электрон скатывается вниз, а дырка наверх, что приводит к внутренней поляризации точки. Такая поляризация затем приводит к смещению резонанса проводимости в режиме одноэлектронного транзистора и легко детектируется по изменению (переключению) тока через точку (см. рисунок 3). Каждое переключение вызвано одноэлектронной поляризацией внутри структуры квантовой точки (рисунок 2).



Рисунок 3. Влияние слабого излучения на частоте циклотронного резонанса (λ ≈ 190 мкм) на пик проводимости в магнитном поле B = 3,67 Тл и T = 70 мК. (а) Без излучения. (b) При слабом освещении (ток эмиттера: I_{em} = 2 мкА). (c) С увеличением освещения (I_{em} = 3,5 мкА).

Время жизни поляризованного состояния зависит от магнитного поля, которое определяет внутреннюю структуру точек (рисунок 2) и варьируется в широких пределах. На рисунке 4(а) приведено экспериментально измеренное время жизни в квантовой точке, как функция магнитного поля. Пилообразная зависимость возникает из-за того, что внутренняя структура испытывает скачкообразное изменение, когда электрону становится выгодно перейти из ядра $(LL2\downarrow)$ в кольцо $(LL1\uparrow)$, например, при увеличении магнитного поля. В этом случае размер кольца скачкообразно уменьшается, что приводит к увеличению расстояния между ядром и внутренним кольцом и подавлению времени рекомбинации.



Рисунок 4 – (а) Время жизни τ электронно-дырочной пары в квантовой точке как функция магнитного поля *B*. На вставке – сравнение τ с положением пика проводимости в темноте. (b) Температурная зависимость τ . На вставке показано значение $\ln \tau^{-1}$ в зависимости от обратной температуры 1/*T*. Пунктирная прямая линия показывает $\exp(E^*/kT)$ при $E^* = 100$ мкэВ.

На рисунке 5 приведена система из двух квантовых точек (D1 и D2). Квантовые точки связаны электростатически (через емкость). Электроды G2 и G1 служат также в качестве антенны для возбуждения электронов в D2 на частоте плазменного резонанса. На основе таких систем продемонстрировано детектирование одиночных фотонов в терагерцовом диапазоне на частоте, близкой к 500 ГГц на плазменном резонансе без магнитного поля. Изучены различные физические свойства таких систем.



Рисунок 5 – Детектор фотонов на двойной квантовой точке (D1 и D2). Металлические электроды (G1, G2. G12), формирующие квантовую точку, изображены светлым. Фотон поглощается в D2, и возбуждённый электрон убегает из квантовой точки. Положительный заряд смещает пик проводимости аналогичным образом, как на рисунке 4.

Вторая глава

Глава посвящена изучению различных свойств сверхпроводниковых квантовых систем [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26], в частности, когерентности [27], свойствам шума [28, 29, 30], различным реализациям кубитов, а также серии

пионерских работ по реализации двух взаимодействующих кубитов [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]. В этой главе изучаются некоторые важные фундаментальные физические аспекты сверхпроводниковых кубитов и их взаимодействия. Также было впервые показано, что возбуждённый кубит релаксирует в основное состояние благодаря квантовому шуму [28]. Изученные в этой главе свойства сверхпроводниковых квантовых систем непосредственно используются для экспериментов в области квантовой оптики на чипе.

Когерентное взаимодействие двух квантовых систем.

Впервые было продемонстрировано когерентное взаимодействие двух сверхпроводниковых кубитов [34, 36] и вентиль СNOT [38]. Были также впервые изучены времена декогеренции двухуровневых систем, их физические свойства и природа. На рисунке 6 показана двухкубитная схема, состоящая из двух зарядовых кубитов, связанных через ёмкость, на основе которой показана когерентная динамика такой системы. Зарядовые кубиты представляли из себя алюминиевые островки с туннельной (джозефсоновской) энергией E_J и полной ёмкостью *C*. Зарядовая энергия таких островков $E_C = \frac{4e^2}{2C}$ значительно превышала джозефсоновскую ($E_C \gg E_J$), что означает, что приближение двухуровневой системы хорошее в окрестности точки вырождения соседних состояний. Принципы работы такого кубита подробно разобраны в работах [27, 34, 32].



Рисунок 6 – Первый двухкубитный вентиль.

Схема первого реализованного двухкубитного вентиля в зарядовом базисе $|n_1, n_2\rangle = |n_1\rangle \otimes |n_2\rangle$, где n_1 и n_2 – зарядовые состояния островков (Box1 и Box2) и могут принимать значения 0 и 1, описывается гамильтонианом

$$\begin{split} H &= \sum_{n_1=0}^{1} \sum_{n_2=0}^{1} E_{n_1 n_2} |n_1, n_2\rangle \langle n_1, n_2| \\ &- \frac{E_{J1}}{2} \sum_{n_2=0}^{1} (|0\rangle \langle 1| + |1\rangle \langle 0|) \otimes |n_2\rangle \langle n_2| - \frac{E_{J2}}{2} \sum_{n_1=0}^{1} |n_1\rangle \langle n_1| \otimes (|0\rangle \langle 1| + |1\rangle \langle 0|), \end{split}$$

где E_{J1} (E_{J2}) – джозефсоновская энергия первого (второго) островков, а $E_{n_1n_2}$ – электростатическая энергия системы состояния $|n_1, n_2\rangle$. Работа СNOT-вентиля на двух зарядовых кубитах, связанных через ёмкость, основывается на том, что динамика одного кубита зависит от состояния второго, поскольку в энергию E_{n1n2} входит перекрёстный член взаимодействия.

Однократное считывание.

Далее было также впервые продемонстрировано однократное считывание кубита [39]. Однократное считывание – важный элемент квантовых Эксперимент также производился с зарядовым компьютеров. кубитом. Фотография устройства, полученная в электронном микроскопе, показана на рисунке 7. К островку (Вох) был добавлен другой большой остров – ловушка (Trap) через маленький переход. Если кубит находится в состоянии |1), то добавочная купперовская пара туннелирует в ловушку и заряжает её, состояние же |0) не приводит к зарядке ловушки. Заряд в ловушке «живет» несколько миллисекунд и может быть обнаружен чувствительным электрометром по резонансному току через SET.



Рисунок 7 – СЭМ изображение устройства для однократного считывания зарядового кубита.

Декогеренция в зарядовом кубите

Такая схема позволила впервые напрямую исследовать времена релаксации, вызванные высокочастотным квантовым зарядовым шумом, а также охарактеризовать низкочастотный зарядовый 1/f шум. Релаксации зарядового кубита Γ_1 на частоте ω вызывается шумом со спектральной плотностью $S_U(\omega)$ (в единицах электростатической энергии U) в соответствии с выражением

$$\Gamma_1 = \frac{\pi S_U(\omega)}{2\hbar^2} \sin^2 \theta,$$

где $\sin \theta = E_J / \Delta E$, ΔE – энергия кубита. Результат измерения шумов, пересчитанных из времен релаксации, показан на рисунке 8(а), где видно, что $S_U(\omega)$ имеет линейную зависимость от частоты, как если бы квантовый шум напряжения был омический (пропорционален частоте $f = \omega/2\pi$), и его спектральная плотность напряжения

$$S_V(\omega) = \frac{\hbar\omega R}{\pi}$$

где среднеквадратичные отклонения напряжения определяются как $\langle \delta V^2 \rangle = \int S_V(\omega) d\omega$ – интеграл в соответствующем диапазоне частот и $S_U = 4e^2 S_V$ [28].



Рисунок 8 – (а) Экспериментально полученная спектральная плотность шума. Экстраполированные 1/*f* шум и *f*-шум пересекаются на частоте ~3 ГГц. (b) Схематическое объяснение поведения шумов. Пресечение на частоте *ω_c* указывает на общую природу обоих шумов.

Независимо выведенная спектральная плотность низкочастотного шума по величине дефазировки кубита, даёт значения для $S_U = \left(\frac{4E_C}{e}\right)^2 \frac{\alpha}{f}$ с величиной $\alpha \approx (1,3 \times 10^{-3} e)^2$. Главный же научный результат состоит в том, что продолженные 1/f и f шумы пересекаются на частоте, близкой к частотам тепловых флуктуаций $T_c \approx 0,1$ K. Это в дальнейшем было объяснено наличием большого числа двухуровневых флуктуаторов в модели двухъямного потенциала с распределением высот барьеров, которые, в свою очередь, экспоненциальным образом влияют на туннельную энергию [40]. В такой модели можно легко получить омическую (линейную) зависимость квантового шума и 1/fзависимость низкочастотного шума с пересечением на частоте $\omega_c \approx kT_c/\hbar$. Эта модель, в частности, предполагает, что классический термически возбуждённый 1/f шум должен иметь квадратичную зависимость от температуры. Это действительно было обнаружено в следующей работе [29].

<u>RF-SQUID кубит и потоковый кубит с двумя петлями</u>

Также в этой главе представлены новые кубиты. Например, был изготовлен RF-SQUID на основе гибридной технологии: джозефсоновский переход на основе Al/AlO_x/Al в колечке из индуктивности в виде полоски тонкой пленки TiN (рисунок 9) [41]. Тонкая плёнка TiN обладает большой кинетической индуктивностью.



Рисунок 9 – (а) Электрическая схема RF-SQUID-а. Левая часть кольца выполнена из алюминия, тогда как правая (узкая полоска) из тонкой пленки нитрида титана. (b) Изображение, полученное с помощью электронного микроскопа. На вставке показан джозефсоновский переход. (c) Пример формы потенциала с уровнями энергии и волновыми функциями.

Следующий пример нового типа кубита – потоковый кубит с двумя петлями. Такой кубит имеет устойчивость к глобальным флуктуациям магнитного поля за счёт симметрии [42]. Изображение кубита представлено на рисунке 10. Туннелирование квантов потока между петлями происходит через центральный переход.



Рисунок 10 – (а) Изображение кубита, полученное с помощью электронного микроскопа. (b) Изображение нескольких кубитов, связанных емкостным образом с линией. (c) Эквивалентная электрическая схема кубита, связанного с линией прохождения.

Различные схемы и режимы потоковых кубитов, их сравнение с добавлением шунтированных зарядовых кубитов были рассмотрены и систематизированы в работе [43]. На рисунке 11 схематично приведены



Рисунок 11 – Квантовые системы в нелинейных потенциалах. Расчеты для энергии основного перехода $E_{01}/h = 5 \Gamma \Gamma \mu$. (а) Различные типы потенциалов: (I) шунтированный зарядовый кубит. (II-IV) RF-SQUID при смещении на пол кванта потока. (II) Потенциал

четвертой степени, когда $E_J = E_L$ ($\eta = 1$). (III) Потенциал с $E_J > E_L$ ($\eta > 1$).

Ангармоничность больше. (IV) Режим с выраженным двухъямным потенциалом. Расщепление нижнего уровня возникает из-за туннелирования кванта потока через барьер, разделяющий ямы. Ангармоничность большая. (b) *E*_L от *E*_C при нес-кольких значениях *η*.

(с) Ангармоничность ζ как функция E_C при различных значениях η .

различные режимы. Параметр $\eta = E_J/E_L$ характеризует отношение джозефсоновской и магнитной энергий к линейной индуктивности. Параметр $\zeta = \Delta E_{21}/E_{10}$ характеризует относительный ангармонизм системы, где $E_{10} = E_1 - E_0$ – разница энергий между первым возбужденным и основным состоянием, а $\Delta E_{21} = E_{21} - E_{10}$ абсолютное значение ангармонизма.

Третья глава

Третья глава посвящена новому направлению в физике – квантовой оптике на сверхпроводниковых квантовых системах [44, 45]. Впервые экспериментально продемонстрировано несколько физических эффектов: когерентная связь потокового кубита с резонатором [46, 47, 48, 49], лазерный эффект на одиночном искусственном атоме [50, 51, 52, 53], сильная связь одиночного атома с открытым пространством (одномерной копланарной линией) [54], прямая спектроскопия трёхуровневой квантовой системы [55], резонансная флуоресценция [54], квантовый усилитель на одиночном атоме [56], электромагнитно-индуцированная прозрачность [57]. Продемонстрирован перестраиваемый источник фотонов по требованию с высокой эффективностью [58, 59, 60, 61, 62, 63]. Показан новый эффект квантовой оптики – квантовое смешивание волн (КСВ) – развитие и предельный случай четырёхволнового смешения, когда в качестве нелинейного элемента выступает одиночная квантовая система [64, 65, 66, 67, 68, 69].

Основные отличия квантовой оптики на чипе на искусственных сверхпроводниковых квантовых системах от квантовой оптики на естественных атомах можно сформулировать следующим образом:

1. Со сверхпроводниковыми квантовыми системами легко достигается физически сильная связь к внешнему окружению, например, к соседним квантовым системам, к резонаторам, к открытым микроволновым линиям.

 Квантовые системы работают в СВЧ диапазоне с длинами волн порядка 1 см.

3. Параметры таких систем могут быть рассчитаны заранее.

Двухуровневая квантовая система, связанная с резонатором, описывается хорошо известным в квантовой оптике гамильтонианом Джейнса-Каммингса (Jaynes-Cummings):

$$H = \hbar \omega_r a^{\dagger} a - \frac{\hbar \omega_a}{2} \sigma_z + g (\sigma^+ a + \sigma^- a^{\dagger}),$$

который состоит из трёх членов: первый член — гамильтониан резонатора с частотой ω_r , второй член — двухуровневый атом с частотой перехода ω_a , а третий член описывает взаимодействие между резонатором и атомом с энергией взаимодействия *g*. В роли двухуровневой системы выступает сверхпроводниковая квантовая система.

Потоковый кубит, связанный с резонатором.

Первая реализация сильной связи сверхпроводникового кубита с резонатором была показана в работе [70], где зарядовый кубит связали с Мы резонатором через емкость. очередь, впервые же, В свою кубита продемонстрировали СВЯЗЬ потокового с резонатором через индуктивность. Измеряемое устройство показано на рисунке 12. Потоковый кубит вставлен в копланарный резонатор с сужением. Общая часть формирует взаимную индуктивность М. Энергия кубита контролируется внешним магнитным полем. На рисунке 12(b) показано антипересечение в точках, где энергия кубита совпадает с энергией резонатора.



Рисунок 12 – Потоковый кубит, связанный с копланарным резонатором. (а) Схема чипа 2,5×5 мм². Измеряется излучение, прошедшее через копланарный резонатор.

(b) Расщепление в точках резонанса между резонатором и потоковым кубитом.

Лазерный эффект на одиночном искусственном атоме.

Один из наиболее интересных квантово-оптических эффектов – лазерный эффект на одном искусственном атоме. Впервые он был продемонстрирован на искусственном атоме в геометрии зарядового кубита с $E_C \gg E_J$ в работе [50]. Схема и принципы работы изображены на рисунке 13.

Остров (Island) через джозефсоновские переходы соединен с резервуаром (Ground). Потенциал острова контролируется через смещенный напряжением V_g электрод (Gate). Сток (Drain) смещается напряжением V_b , где $V_b \approx (2\Delta + E_c)/e$, куперовская пара состояния $|2\rangle$ разрушается и заряд туннелирует в сток через две квазичастицы: $|2\rangle \rightarrow |1\rangle \rightarrow |0\rangle$. При этом, если напряжение V_b выбирается так, что энергия состояния $|0\rangle$ больше энергии состояния $|1\rangle$, то реализуется схема инверсной заселённости, показанная на рис 13(d). В такой схеме наблюдалось лазерное излучение, когда энергия двухуровневой системы приближалась к резонансу резонатора. В стационарном лазерном режиме количество фотонов ~30, и линия излучения сужается.



Рисунок 13 – (а) Схема и принцип работы мазера на одиночном искусственном атоме. (b) Фотография искусственного атома (зарядового кубита). (c) Атом располагается на краю резонатора, где поле резонатора близко к максимуму. (d) Механизм инверсной заселенности с токовой накачкой. (e) Лазерное излучение. Излучение – узкий левый пик. Широкий правый пик – прохождение через резонатор. Лазерное излучение приводит к сужению пика излучения.

Резонансная флуоресценция на чипе в СВЧ диапазоне.

Другой фундаментальный эффект квантовой оптики – резонансная флуоресценция. Это эффект рассеяния излучения на атоме в резонансе. Излучение поглощается атомом и переизлучается в 4π телесный угол (см. рисунок 14(а)). На чипе искусственный атом можно связать с копланарной СВЧ линией. В таком случае можно наблюдать эффект резонансной флюоресценции по рассеянию излучения. Эффект был реализован в схеме, изображенной на рисунке 14(b) с потоковым кубитом, связанным индуктивно с копланарной линией: участок линии является частью петли. Это эквивалентно тому, что колечко связано с линией взаимной индуктивностью.



Рисунок 14 – (а) Схематичное изображение атома в открытом пространстве. (b) Потоковый кубит связан с линией пропускания. (c) Пропускание СВЧ излучения в зависимости от магнитного поля (энергии кубита) и частоты.

На рисунке 14(с) показано пропускание в линии как функция частоты и магнитного поля. Магнитное поле перестраивает энергию двухуровневой Тёмная линия (прохождение меньше единицы) соответствует системы. ожидаемой частоте кубита. На вставке рисунка 14(с) показан квадрат амплитуды прохождения (соответствует прохождению мощности) в нижней точке при малой амплитуде волны. Почти вся волна отражается OT единичного искусственного Такая эффективность атома. высокая означает, что

излучательная релаксация кубита Γ_1^r с испусканием фотонов в линию существенно превышает безызлучательную релаксацию Γ_1^n . То есть искусственный атом сильным образом связан с линией.

Амплитуда волны, испускаемой атомом, выражается в виде тока

$$I_{sc}(x,t) = i \frac{\hbar \Gamma_1}{\phi_p} \langle \sigma^- \rangle e^{ik|x| - i\omega t},$$

где x – координата (атом расположен при x = 0), t – время, Γ_1 – скорость излучательной релаксации в линию, k и ω – волновой вектор и частота, $\phi_p = MI_p$ – дипольный момент ($\hbar\Omega = MI_p$) M – взаимная индуктивность, I_p – циркулирующий ток. При увеличении амплитуды падающей волны, часть волны рассеивается неэластично. Спектр такого излучения представляет собой триплет резонансной флюоресценции или триплет Моллоу как показано на рисунке 15.



Рисунок 15 – Триплет резонансной флюоресценции в неэластичном рассеянии излучения на искусственном атоме. (а) Триплет при фиксированной амплитуде волны. (b) Триплет в зависимости от мощности. Боковые пики отстоят от центральной частоты на частоту Раби.

На такой системе в открытой линии было продемонстрировано несколько квантово-оптических эффектов. Среди них – квантовый усилитель на одиночном атоме и индуцированная прозрачность. Эти эффекты показаны соответственно на рисунках 16 и 17.

<u>Трёхуровневый искусственный атом: спонтанная релаксация, пре-</u> дельный квантовый усилитель, электромагнитно индуцированная прозрачность.



Рисунок 16 – Предельный (на одной квантовой системе) квантовый усилитель. Усиление пробного сигнала (на частоте нижнего перехода) на уровне 1.09 близко к максимально возможному для единичного атома, сильно связанного с линией. (а) Амплитуда и фаза при разных амплитудах накачки. Вставка – пропускание на нижнем переходе от амплитуды пробного сигнала. (b) Амплитуда и фаза от накачки при небольшой отстройке.



Рисунок 17 – Электромагнитно-индуцированная прозрачность. В резонансе отражение пропадает при сильной накачке между возбужденными уровнями. (a,b) Амплитуда и фаза прошедшей волны. (c,d) Компьютерные симуляции при тех же условиях, что и в эксперименте. (e) Трехуровневая схема с накачкой.

Для реализации квантового усилителя система накачивается на частоте f_{31} . Такое возможно вне симметричной точки. Система быстро релаксирует на первый возбуждённый уровень с образованием инверсной заселённости. Пропускание волны на частоте f_{21} приводит к её усилению.

Эффект электромагнитно-индуцированной прозрачности на чипе показан на рисунке 17(е). Измеряется пропускание на частоте f_{21} . Как было показано ранее, значительная часть волны отражается, но, когда включается накачка на частоте f_{32} , отражение выключается. Этот эффект может быть объяснен расщеплением линии при накачке f_{32} и, следовательно, «выключением» резонанса f_{21} .

Временная динамика излучения в линию.

В работе [71] была измерена временная динамика излучения в линию (рисунок 18). Важно, что когерентная часть излучения на частоте возбуждения $V_{sc}e^{-i\omega t}$ содержит информацию о $\langle \sigma_x \rangle$ и $\langle \sigma_y \rangle$, а некогерентная (полная мощность) – заселенность, т.е. $\langle \sigma_z \rangle$. При этом $\langle \sigma_x \rangle \sim \text{Im}[V_{sc}], \langle \sigma_y \rangle \sim -\text{Re}[V_{sc}]$ и $1 - \langle \sigma_z \rangle \sim W_{sc}$. Когерентные компоненты измеряются анализаторами цепей, а мощность измеряется спектральным анализатором.



Рисунок 18 – (а) Измеренная эволюция $\langle \Delta \sigma_{x,y} \rangle$ с начальными условиями $\sigma_x(0) = 1, \sigma_{y,z}(0) = 0$. (b) Начальные условия $\sigma_y(0) = 1, \sigma_{x,z}(0) = 0$. (c) Вычисленная корреляционная функция $\langle \Delta \sigma^+(0) \Delta \sigma^-(t) \rangle_{ss}$ из измеренной эволюции. Вставка: триплет резонансной флюоресценции, вычисленный из коррелятора (линия) и померянный впрямую (точки).

<u>Высокоэффективный перестраиваемый источник СВЧ фотонов по</u> <u>требованию.</u> Сильная связь с открытой линией дает также возможность контроля фотонов в открытом пространстве. В работе [59] продемонстрирован высокоэффективный перестраиваемый источник фотонов по требованию. Схема источника и принципы работы показаны на рисунке 19.



Рисунок 19 – Перестраиваемый высокоэффективный источник фотонов. (а) Оптический аналог. (b) Принцип работы. (c) Устройство в оптическом микроскопе. (d) Электрическая схема. (e) Коррелятор *g*⁽²⁾(τ): темная экспериментальная кривая, светлая – расчетная.

Сверхпроводниковый потоковый кубит подсоединен к двум копланарным линиям, открытые концы которых связаны с потоковым кубитом через емкости C_c и C_e несимметричным образом: $C_e \gg C_c$ (от кубита идет тонкая металлическая полоска и формирует соответствующие ёмкости). В такой схеме линии развязаны: волна слева не распространяется в линию направо, но кубит может быть возбужден импульсом слева. После возбуждения кубита в состояние $|1\rangle$, он релаксирует с испусканием фотона вправо. При этом вероятность испускания влево подавлена как $(C_c/C_e)^2$.

На рисунке 19(е) показан двухвременной коррелятор

$$g^{(2)}(\tau) = \int \langle V_1^2(t) - \langle V_1^2(t) \rangle \langle V_2^2(t+\tau) - \langle V_2^2(t+\tau) \rangle dt$$

где сигнал в левой части делится разветвителем на два канала (аналог полупрозрачного зеркала), затем независимо усиливается и детектируется АЦП, как функция времени $V_1(t)$ и $V_2(t)$. Фотоны генерируются с периодом T = 160 нс. Слабый сигнал от фотонов приходится долго усреднять и вычитать шум усилителей, который примерно в 100 раз превышает сигнал от фотонов. В этом

состоит существенное отличие (и большая трудность!) нашего эксперимента в СВЧ от экспериментов в обычной квантовой оптике, где есть доступные детекторы фотонов. Рисунок 19(е) – результат $1,5 \times 10^{10}$ временных отрезков, каждый по 1600 точек с шагом 4 нс. Антикорреляция при $\tau = 0$ указывает на то, что источник, действительно, испускает одиночные фотоны, так как фотон не может быть задетектирован на обоих детекторах одновременно.

В работе [59] показано, что источник перестраивается в диапазоне 7,8 – 10,5 ГГц, а эффективность испускания фотона варьируется от 65 до 80%. В следующей работе [58] эффективность уже достигла 98%.

Квантовое волновое смешивание.

На искусственном атоме на чипе можно также демонстрировать эффекты, которые трудно наблюдать в обычной квантовой оптике (рисунок 20). В работе [64] был показан новый фундаментальный эффект квантовой оптики – квантовое смешивание (KBC). Этот эффект волновое является развитием четырёхволнового смешивания, только вместо нелинейной среды использовалась квантовая система – одиночный искусственный атом. Рисунок 20 демонстрирует несколько интересных свойств КВС.



Рисунок 20 – Эффект квантового волнового смешивания. (а) Когерентное излучение. (b) Осцилляции пиков описываются функциями Бесселя. (c) Квантовое смешивание от двух неперекрывающихся импульсов на двухуровневой системе. (d) Квантовое смешивание от двух неперекрывающихся импульсов на трехуровневой системе.

Когда две близкие по частотам монохроматические волны (ω_{-} и ω_{+}) падают на квантовую систему близко к резонансу, то появляется серия боковых пиков, отстоящих от центральной частоты $\omega_{0} = (\omega_{-} + \omega_{+})/2$ на $\pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \delta \omega$, где $\delta \omega = \omega_{+} - \omega_{-}$ и n – целое число. Каждая частота соответствует нелинейному процессу нечётного порядка 2n + 1 и записывается как $(n + 1)\omega_{+} - n\omega_{-}$ для пиков справа или $(n + 1)\omega_{-} - n\omega_{+}$ для пиков слева. Важно, что на одиночной квантовой системе в каждый момент времени может происходить только один акт рассеяния. Другое важное обстоятельство: каждый пик соответствует рассеянию 2n + 1 фотонов в главном порядке. Когда две когерентных волны падают на атом, то нет ограничения на количество пиков (рисунок 20(а)), так как когерентное состояние содержит фотонные состояния $|N\rangle$ с любым N:

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{N=0}^{\infty} \frac{\alpha^N}{\sqrt{N!}} |N\rangle.$$

В случае если прикладывать импульсы, то временные гармонические осцилляции Раби раскладываются по функциям Бесселя нечётных порядков 2n + 1 (рисунок 20(b)).

Отдельно показан интересный и ранее ненаблюдаемый эффект. Если развести импульсы частот ω_{-} и ω_{+} так, чтобы они не перекрывались во времени, то в спектре появляется только один дополнительный пик на частоте $2\omega_{+} - \omega_{-}$ (рисунок 20(с)). Причина этого в том, что после первого импульса на частоте ω_{-} состояние в атоме в общем виде можно записать как $a|0\rangle_{-} + b|1\rangle_{-}$, то есть оно содержит не более одного фотона. Когда прикладывается второй импульс, то только частота $2\omega_{+} - \omega_{-}$ возможна, так как все другие боковые частоты требуют более одного фотона. Например, $3\omega_{+} - 2\omega_{-}$ и $2\omega_{-} - \omega_{+}$ требуют двух фотонов на частоте ω_{-} , и т. д.

Этот эффект получил дополнительное изящное развитие. Было показано, что в искусственном атоме с двумя эквидистантными переходами (рисунок 19(d)) возможно появление двух новых пиков на частотах $3\omega_{+} - 2\omega_{-}$ и $2\omega_{-} - \omega_{-}$

 ω_+ , потому что состояние в атоме после первого импульса $a|0\rangle_+ b|1\rangle_+ c|2\rangle_-$ содержит состояние |2⟩. На рисунке 20(d) показан спектр с пятью пиками.

В дальнейшем были показаны другие интересные свойства квантового волнового смешения, в том числе то, что высота пиков определяется фотонной статистикой [65].Проработана теория рассеяния неклассической волны [66], показан метод контроля числа фотонов в многофотонном процессе [67].

Четвёртая глава

Четвёртая глава посвящена ещё одному новому и перспективному направлению – квантовой акустике. Квантовая акустика в значительной мере аналогична СВЧ квантовой оптике, но вместо электромагнитных волн используются акустические волны с длиной волны на четыре порядка меньше, а фотоны заменяются фононами. Реализованы различные режимы подвешенного мостика микронного размера. На таких мостиках достигнута резонансная частота механических колебаний близко 0,77 ГГц [72, 73, 74, 75, 76, 77]. Изучены акустические системы на поверхностных волнах в пьезоакустических системах [78, 79, 80, 81]. Впервые реализована квантовая связь сверхпроводникового кубита к резонатору на поверхностных волнах. Резонатор при этом работает на частотах 3 ГГц. Изучен искусственный фононный кристалл в квантовом режиме, сформированный периодической структурой встречно-штыревых преобразователей (ВШП) на поверхности кварца. Продемонстрированы оптическая и акустические моды кристалла и их связь со сверхпроводниковой квантовой системой

<u>Сильная связь между искусственным атомом и акустическим</u> резонатором.

Акустический резонатор на поверхностных акустических волнах (ПАВ) представляет из себя периодическую структуру. Для возбуждения ПАВ делают набор чередующихся металлических полосок двух типов, на которые можно прикладывать переменное напряжение и возбуждать акустические волны, распространяющиеся перпендикулярно полоскам. Такие структуры называются

встречно-штыревые преобразователи (ВШП, также IDT – interdigital transducer). Размер элементарной ячейки ВШП определяет длину волны, на которой работает ВШП. В настоящее время с помощью электронно-лучевой литографии стало возможно изготавливать такие структуры на частотах в СВЧ области (в гигагерцовом диапазоне). А это означает, что акустический резонатор может работать в квантовом режиме, когда число тепловых фотонов меньше единицы, если выполнено условие $\hbar\omega_r \gg k_B T$, где ω_r – резонансная частота акустического резонатора, k_B – постоянная Больцмана, а T – температура.

В работе [78] был изготовлен акустический резонатор (рисунок 21(a, b)) с резонансной частотой $\omega_r/2\pi = 3,176$ ГГц с шагом элементарной ячейки, включающем два встречных электрода, 980 нм. Резонатор ограничивается брэговскими зеркалами с полными размерами 100 мкм × 100 мкм. Количество полосок в каждом зеркале было 200. Изготовление такого устройства требует сложной литографии.



Рисунок 21 – (a) Принцип работы устройства. (b) Фотографии устройства и его элементов.

Внутри резонатора располагаются три ВШП: источник (для возбуждения волн – Input IDT), ВШП для детектирования сигнала (Output IDT) и ВШП, соединённый с кубитом типа трансмон (Transmon). К источнику и детектору подводятся копланарные линии. Выходной сигнал усиливается холодным и затем комнатными усилителями. В такой схеме удалось впервые показать антипересечение – расщепление линии резонатора благодаря взаимодействию с двухуровневым атомом. Результат эксперимента показан на рисунке 22.

Энергия связи *g/h* = 15,7 МГц, что соответствует расчётной величине. Ограничивающий фактор связи такой схемы – большой внутренний объем

(площадь резонатора). Поперечный размер резонатора выбирается большим для того, чтобы минимизировать утечку из-за дифракционной расходимости. В следующей работе [79] мы показали, как ограничить утечки. На рисунке 23 показана структура ВШП ИЗ алюминиевых полосок. ограниченная параллельными электродами. Электроды для акустических волн выступают в роли среды с немного меньшим показателем преломления, что достаточно для ограничения волн в объеме. Волны под малым углом не могут выйти из объема из-за полного внутреннего отражения. На фотографии устройства (рисунок 23(с)) кубит располагается справа внизу и содержит СКВИД для контроля энергии. Кубит располагается справа внизу и содержит СКВИД для контроля энергии.



Рисунок 22 – Спектроскопия атома с резонатором. Энергия двухуровневой системы контролируется внешним магнитным потоком Ф через СКВИД. (a,c) Амплитуда и фаза сигнала, когда энергия кубита меняется вдоль пунктирной линии. (d) Энергия кубита меняется в широком диапазоне (два пересечения). (d) Расчетный спектр.

В таком устройстве было обнаружено несколько резонансных квазинормальных мод. Все моды ложатся на оптическую и акустическую ветви фононного кристалла (см. рисунок 24). Это полностью согласуется с нашими расчётами.



Рисунок 23 – (а) Сверхпроводниковый искусственный атом связан с акустическим фононным кристаллом и с открытым пространством. (b) Схематическое изображение ВШП, которое также образует шунтирующую емкость трансмона. (c) Фотография устройства в микроскопе.



Рисунок 24 – (а) Кривая фононной дисперсии (сплошная) вблизи первого края зоны Бриллюэна. Квазинормальные моды (КНМ) *f*_{*i*,1} изображены темными точками. Светлыми стрелками показаны экспериментально наблюдаемые частоты. (b, c) Добротность (b) и сила связи (c) для набора КНМ, близких к запрещенной зоне (белая полоса).

Пятая глава

Эта глава посвящена квантовым системам на основе нового эффекта – квантового проскальзывания фазы в сверхпроводниковых нанопроволочках. В наших работах свойства квантового проскальзывания фаз изучались и демонстрировались с помощью методов квантовой оптики на чипе, аналогичных тем, которые использовались в главах 2 и 3. Впервые продемонстрирована суперпозиция квантов потока в сверхпроводниковом колечке с нанопроволочкой [82]. Изучены кубиты на основе эффекта квантового проскальзывания фазы с помощью СВЧ спектроскопии [83, 84]. Показана интерференция двух амплитуд фазы [85]. Впервые проскальзывания продемонстрирован эффект нестационарного проскальзывания фазы под действием микроволнового излучения [86]. Этот эффект представляет из себя фундаментальный эффект нестационарному эффекту физики И полностью дуален Джозефсона. Нестационарный эффект принципиально важен для квантовой метрологии и открывает возможность создания квантового стандарта тока.

Эффект когерентного квантового проскальзывания фазы CQPS (Coherent Quantum Phase-Slip) – фундаментальный эффект физики. Он представляет из себя туннелирование квантов магнитного потока через сверхпроводящую нанопроволочку. Физически CQPS дуален классическому джозефсоновскому эффекту, который, в свою очередь, является туннелированием куперовских пар (элементарного заряда сверхпроводимости) через потенциальный барьер тонкого слоя диэлектрика. Было показано, что на эффекте проскальзывания фазы в вольт-амперных характеристиках под действием микроволнового излучения можно получить ступеньки по току аналогичные ступенькам по напряжению в нестационарном джозефсоновском эффекте. Теоретически такие ступеньки были впервые описаны ещё в 80-х годах в работе Константина Лихарева с коллегами [19].

Кубиты на эффекте когерентного квантового проскальзывания фазы

Впервые квантовое проскальзывание фазы в нанопроволочке было впрямую продемонстрировано в наших экспериментах посредством

суперпозиции двух квантов магнитного потока в сверхпроводниковом колечке из тонкой плёнки аморфного InO_x. Сверхпроводящая нанопроволочка в колечке играла роль туннельного барьера для квантов магнитного потока [82]. На рисунке 25 показана фотография первого кубита на проскальзывании фазы.

Колечко из тонкой плёнки InO_x было интегрировано в копланарный резонатор, центральный проводник которого выполнен из той же плёнки (рис. 25(а)). Эффективно колечко связано с резонатором через взаимную индуктивность. Измерения (спектроскопия уровней системы) производились через резонатор методом дисперсионного считывания.



Рисунок 25 – Изображения CQPS кубита из тонкой плёнки InO_x: (а) колечко в оптическом микроскопе. (b) Нанопроволочка в электронном микроскопе. Колечко вставлено в копланарный резонатор (полоска снизу на (а)), что позволяет проводить спектральные измерения уровней кубита методом дисперсионного считывания.

Спектральные линии кубита в зависимости от внешнего магнитного потока Φ_{ext} , проникающего через колечко, показаны на рис. 25. Важно, что частота спектральной линии кубита в минимальной точке (f_{min}) не достигает нуля, потому что вырождение снимается за счёт туннельной энергии $E_S = h f_{min}$ (h – постоянная Планка), т.е. энергии проскальзывания фазы. Гамильтониан такой квантовой системы может быть записан в общем виде как

$$H = \sum_{N} E_{N} |N\rangle \langle N| - \frac{E_{S}}{2} (|N\rangle \langle N+1| + |N+1\rangle \langle N|),$$

где N – число квантов потока $\Phi_0 = h/2e$ в колечке, $E_N = (N \Phi_0 - \Phi_{ext})^2/2L$ – энергия состояния $|N\rangle$ в магнитном поле с потоком Φ_{ext} , проникающим через колечко с индуктивностью L. В случае, когда магнитная энергия $E_L = \Phi_0^2/2L$ намного больше E_s вблизи точки вырождения, например, $\Phi_{ext} \sim \Phi_0/2$, система может быть описана в приближении двух ближайших уровней, которые определяются двумя соседними потоковыми состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Гамильтониан упрощается до

$$H = -\frac{\varepsilon}{2}\sigma_z - \frac{E_S}{2}\sigma_z$$

в потоковом базисе, где $\sigma_z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|$ и $\sigma_x = |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|$, $\varepsilon = (\Phi_0/2 - \Phi_{ext})\Phi_0/L$. Энергия расщепления такого кубита описывается уравнением $\Delta E = \sqrt{\varepsilon^2 + E_S^2}$, что показано на рисунке 26 пунктирными линиями.



Рисунок 26 – Спектры кубита: (а) в узком диапазоне частот, (б) в широком диапазоне.

В дальнейшем кубиты на эффекте CQPS были реализованы в тонких плёнках TiN, NbN. Это указывает на независимость эффекта от каких-либо уникальных свойств только InO_x и говорит о его универсальности и фундаментальности [83, 84]. Все плёнки, в которых удалось показать суперпозицию квантов магнитного потока, имеют большое сопротивление в нормальном состоянии, превышающее 1 кОм на квадрат, и относятся к классу сильно неупорядоченных материалов.

Квантовая интерференция амплитуд проскальзывания фаз: ЗКВИД

Следующим этапным экспериментом была демонстрация интерференции двух туннельных амплитуд проскальзывания фаз. Устройство для такой демонстрации представляет из себя дуальный аналог СКВИД-а, но смещение осуществляется наведённым зарядом вместо магнитного потока [85]. На рис. 27(а) показан кубит, состоящий из колечка с двумя сужениями (CQPS

переходами) и островом между ними. Две туннельные амплитуды магнитного потока через сужения E_{S1} и E_{S2} складываются с фазой, которая определяется наведённым зарядом $q = V_g C_g$ на острове:

$$E_S = \left| E_{S1} + E_{S2} e^{i \frac{q}{2e}} \right|,$$

где V_g – напряжение на затворе, а C_g – ёмкость между затвором и островом, как показано на рис. 27(а). Это приводит к негармоническим осцилляциям суммарной энергии E_S в зависимости от q. Энергия E_S детектировалась впрямую по спектроскопии в точке вырождения кубита. Наблюдались осцилляции E_S от наведённого заряда точно так же, как в СКВИД-е наблюдаются осцилляции суммарной джозефсоновской энергии от наведённого потока.



Рисунок 27 – (а) Изображение кубита, полученное в электронный микроскоп (нижняя панель). Колечко содержит остров с двумя сужениями. К острову подходит металлический затвор, который можно смещать напряжением V_g и контролировать наведённый заряд q. Сверху показана эквивалентная электрическая цепь. (б) Спектральные линии в точке вырождения показывают зависимость E_s or q.

На рис. 27(b) показана спектроскопия кубита в нижней точке по энергии от магнитного потока (точка соответствует $\Phi_{ext} = 0.5\Phi_0$ на рис. 26(a)). Две спектроскопические линии сосуществуют со сдвигом на полпериода (элементарный заряд *e*) из-за квазичастиц, которые свободно проникают на остров через CQPS переход благодаря гальваническому контакту и,

соответственно, сдвигают линию на целое число полупериодов осцилляций. Осцилляции на рис. 27(b) не достигают нуля, потому что амплитуды в эксперименте E_{S1} и E_{S2} не равны в силу технологической сложности изготовления одинаковых нанопроволочек. Такое устройство было названо ЗКВИД (CQUID – Charge Quantum Interference Device) (зарядовый квантовый интерферометр) по аналогии со СКВИД-ом (SQUID).

<u>Нестационарный CQPS эффект</u>

Особо важной вехой в изучении CQPS является демонстрация нестационарного эффекта COPS (AC COPS) _ дуального аналога нестационарного эффекта Джозефсона [86]. Последний проявляется в виде напряжению ступенек Шапиро В ступенек по вольт-амперных характеристиках.

На рис. 28(а) показано изображение устройства, полученное в сканирующем электронном микроскопе. Темные области – структура из тонкой плёнки NbN в виде меандра. В центре находится сужение – нанопроволочка с примерными размерами 20×50 нм² (см. вставка на рис. 28(а)). Упрощённая принципиальная электрическая схема приведена на рис. 28(b). Переход CQPS подключается последовательно с большой индуктивностью и сопротивлением. Полная индуктивность в NbN меандрах достигала 4,4 мкГн при размерах порядка 10 мкм. Маленькие размеры принципиально нужны, чтобы избежать емкостного критически важно, шунтирования перехода. Это чтобы не подавить проскальзывание фаз. СВЧ сигнал подаётся по копланарным линиям (не показаны на фотографии) и подходит к переходу либо через ёмкости C_{κ} , либо через токовые линии I^{\pm} в зависимости от частоты.

Без СВЧ сигнала вольт-амперная характеристика показывает необычные для сверхпроводящей структуры свойства: блокада тока (напоминающая кулоновскую блокаду в одноэлектронных транзисторах), которая характеризуется критическим напряжением V_c , аналогом критического тока I_c в эффекте Джозефсона. Напряжение внутри блокады вызвано когерентным током

квантов магнитного потока через барьер $V = \dot{\Phi}$ (схематично показано розовой стрелкой на рисунке 28(b)).



Рисунок 28 – (а) СЭМ фотография структуры. Более темная структура – плёнка NbN с тонкой проволочкой в центре (~ 20×50 nm²) – показана на вставке. Меандры NbN формируют кинетическую индуктивность (2L' + 2L'' ≈ 4,4 мкГн). Платиновые меандры (светлые) – сопротивления (*R*' ≈ 11,5 кОм). (b) Упрощённая электрическая схема устройства.

Гамильтониан системы, состоящей из CQPS элемента, смещённого постоянным и переменным токами (I_{DC} и I_{AC}), представляется в виде

$$H = \sum_{N} E_{N}(t) |N\rangle \langle N| - \frac{E_{S}}{2} (|N\rangle \langle N+1| + |N+1\rangle \langle N|),$$

где $E_N(t) = -N\Phi_0 I(t)$, а $I(t) = I_{DC} + I_{AC} \cos \omega t$. В резонансе выполняется условие $\Phi_0 I_{DC} = n\hbar\omega$, где n – целое, что соответствует требованиям для наблюдения ступенек с током

$$I_{DC}^{(n)} = 2efn.$$

На рисунке 29 представлены экспериментальные результаты. На двух верхних графиках изображены типичные ступеньки в вольт-амперных характеристиках под действием СВЧ излучения. Нижняя панель демонстрирует двумерный график дифференциального сопротивления (dV/dI) в широком диапазоне постоянного и переменного токов. В дифференциальном сопротивлении ступеньки выглядят как пики при постоянных токах $I_{DC} = 2efn$, амплитуды которых являются функцией переменного тока. А именно, пики осциллируют и определяются функциями Бесселя $J_n^2(I_{AC})$ порядка n с

затуханием. Частота излучения на графиках f = 14.923 ГГц, что соответствует $I_{DC} = n \times 4.775$ нА.

На рисунке 30 показаны положения токовых ступенек $I_{DC}^{(n)}$ в зависимости от частоты в пяти различных образцах на различных частотах (каждый образец показан своим символом и пронумерован S1-S5). Некоторые точки получены не по положению плато, а по положению пиков в дифференциальном сопротивлении. Все точки лежат на прямой $I_{DC} = Q_0 f$, где $Q_0 = (3.20 \pm 0.01) \times 10^{-19}$ С, что соответствует заряду куперовской пары 2*e* с точностью до третьего знака. На вставке показаны те же точки, но в виде I_{DC}/f . Это впрямую показывает величины заряда и наглядно демонстрирует дисперсию точек.



Рисунок 29 – Экспериментальное наблюдение нестационарного эффекта проскальзывания фазы. Верхние графики: ступеньки в вольт-амперных характеристиках при разных амплитудах переменного тока (значения I_{AC} показаны стрелками). Нижний график: осцилляции в dV/dI как функция постоянного и переменного тока.

Кроме большого фундаментального значения, нестационарный эффект когерентного квантового проскальзывания фазы имеет несомненную практическую важность для метрологии: он необходим для того, чтобы «замкнуть» метрологический треугольник квантовых стандартов электрических величин (напряжение-сопротивление-ток), из которых на сегодняшний день отсутствует только квантовый стандарт тока. Наблюдение чётко выраженных токовых ступенек в сверхпроводниках (один из последних нереализованных базовых эффектов фундаментальной сверхпроводимости) до сих пор было труднодостижимым из-за отсутствия подходящих материалов и необычных требований к электрической схеме.



Рисунок 30 – Положение токовых ступенек в зависимости от частоты. Вставка: ток, нормированный на частоту.

Основные результаты и выводы

Следующие основные результаты представлены в диссертации:

1. Продемонстрированы детекторы фотонов на квантовых точках в двумерном газе галлий-арсенидовых гетероструктур. Реализовано два типа детекторов:

- Детектор фотонов в сильных магнитных полях на частоте циклотронного резонанса в терагерцовом диапазоне.
- Детектор фотонов в нулевом магнитном поле на двойной квантовой точке на частоте плазменного резонанса ~ 0,5 ТГц. Оба типа детекторов используют чувствительный электрометр (в режиме одноэлектронного транзистора) с электростатической связью к детектирующей части. Единичный поглощенный фотон при этом приводит к внутренней поляризации в структуре и существенно воздействует на макроскопический ток через SET.

2. Впервые была продемонстрирована когерентная связь двух сверхпроводниковых зарядовых кубитов. На основе такой системы реализован первый вентиль СNOT.

3. Продемонстрирован метод однократного вычитывания сверхпроводникового зарядового кубита. Схема включает в себя чувствительный SET-электрометр и остров-ловушку, который заряжается элементарным избыточным зарядом только в случае, если эволюция кубита заканчивалась в состоянии |1).

4. Изучена когерентная динамика зарядового кубита. Обнаружено, что на высоких частотах кубит релаксирует благодаря омическому квантовому шуму, который пропорционален энергии (частоте f). С другой стороны, система испытывает дефазировку из-за низкочастотных зарядовых флуктуаций со спектром шума 1/f. Продолженные зависимости обоих шумов (f и 1/f) пересекаются на частотах, соответствующих тепловым флуктуациям. Оба типа шумов могут быть объяснены спектром двухъямных зарядовых флуктуаторов, энергии расщепления (возбуждения) которых лежат в широком диапазоне энергий.

5. Впервые продемонстрирован целый ряд фундаментальных эффектов квантовой оптики на чипе в СВЧ диапазоне. Среди этих эффектов:

- Лазерный эффект на одиночном искусственном атоме. Инверсная заселённость осуществляется через имплементированный процесс джозефсоновского квазичастичного цикла (JQP).
- Когерентная (сильная) связь потокового кубита с резонатором.
- Физически сильная связь одиночного атома с открытым пространством (одномерной копланарной линией). Эта работа открыла целое направление в экспериментальной реализации большого класса эффектов квантовой оптики на чипе.
- Эффект резонансной флуоресценции на одиночном искусственном атоме с сильной связью к открытому пространству.

- Эластичное и неэластичное рассеяние электромагнитной волны на одиночной квантовой системе на чипе.
- Минимальный (предельный) квантовый усилитель, состоящий из одиночного искусственного атома, сильно связанного с открытым пространством.
- Электромагнитно-индуцированная прозрачность на одиночном искусственном атоме в открытом пространстве.
- Временная динамика эластичного и неэластичного рассеяния электромагнитной волны на искусственном атоме по излучению из атома. На основе такой динамики продемонстрирована процедура восстановления корреляторов и неэластичных спектров по динамике когерентного излучения от искусственных атомов.
- Лазерный эффект на одиночном атоме с копланарным резонатором с оптической накачкой.
- Прямая спектроскопия трёхуровневой квантовой системы по рассеянию электромагнитной волны на искусственном атоме.
- Перестраиваемый источник фотонов по требованию с высокой эффективностью в СВЧ диапазоне.

6. Открыт новый фундаментальный эффект квантовой оптики – квантовое волновое смешивание. Выявлены различные режимы квантового смешения волн. Показано наличие различных порядков смешения волн на одиночной квантовой системе и их свойства. Показана связь спектра квантового волнового смешения с фотонной статистикой. Экспериментально показано разложение гармонических Раби-осцилляций по порядкам волнового квантового смешения, соответствующего многофотонным процессам различных порядков.

7. Реализованы и изучены разные типы наномеханических систем, перспективные для направления квантовой акустодинамики. Среди них:

Подвешенные наномостики с механическими резонансными частотами до 0,77 ГГц.

• Акустические системы на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Продемонстрированы следующие явления:

• Сильная связь сверхпроводникового кубита с резонатором на ПАВ.

 Квантовый режим акустического резонатора с двухуровневой квантовой системой. Эксперимент закладывает основу для квантовой акустодинамики.

 Фононный кристалл на поверхностных акустических волнах в квантовом режиме. Моды фононного кристалла на периодической системе встречно-штыревых преобразователей на поверхности пьезоэлектрика (кристалл кварца).

 Экспериментально продемонстрирован и изучен эффект когерентного квантового проскальзывания фазы в сверхпроводящих нанопроволочках. Продемонстрировано следующее:

• Суперпозиция двух потоковых состояний в колечке с нанопроволочкой. Реализован кубит на эффекте квантового проскальзывания фазы в нанопроволочке. Изучены механизмы декогеренции в кубитах на квантовом проскальзывании фаз.

• Универсальность (независимость от материала) эффекта квантового проскальзывания фазы. Эффект реализован в нанопроволочках из нескольких различных материалов: InO_x, TiN и NbN.

• Интерференция двух амплитуд проскальзывания фаз. Эффект реализован на кубите с двумя короткими проволочками. Устройство представляет из себя дуальный аналог СКВИД-а.

• Фундаментальный эффект нестационарного проскальзывания фазы под действием микроволнового излучения. Этот эффект представляет из себя фундаментальный эффект физики и физически в точности дуален нестационарному эффекту Джозефсона.

Библиография

- 1. Komiyama S., Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T., Hirai H. A single-photon detector in the far-infrared range // Nature, Vol. 403, 2000. pp. 405-407.
- Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T., Hirai H., Komiyama S. Quantum dot in high magnetic field and far infrared response // IZVESTIYA AKADEMII NAUK SERIYA FIZICHESKAYA, – Vol. 64, – 2000. – pp. 220–226.
- Antonov V., Astafiev O., Kutsuwa T., Hirai H., Komiyama S. Single FIR-photon detection using a quantum dot // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, – Vol. 6, – 2000. – pp. 367–370.
- Komiyama S., Astafiev O., Antonov V., Hirai H., Kutsuwa T. Detection of single FIR-photon absorption using quantum dots // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, – Vol. 7, – 2000. – pp. 698–703.
- Komiyama S., Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T. Detection of single submillimeter-wave photons using quantum dots // Acta Physica Polonica A, – Vol. 98, – 2000. – pp. 271–278.
- Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T., Komiyama S. Electrostatics of quantum dots in high magnetic fields and single far-infrared photon detection // Physical Review B, - Vol. 62, - 2000. - P. 16731.
- Andreev B.A., Erofeeva I.V., Gavrilenko V.I., Korotkov A.L., Yablonskiy A.N., Astafiev O., Kawano Y., Komiyama S. Cyclotron resonance quantum Hall effect detector // Semiconductor science and technology, – Vol. 16, – 2001. – P. 300.
- Astafiev O., Komiyama S., Kutsuwa T. Double quantum dots as a high sensitive submillimeter-wave detector // Applied Physics Letters, – Vol. 79, – 2001. – pp. 1199–1201.
- Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T., Komiyama S. Photon counting detectors for the far infrared // AIP Conference Proceedings. 2002. Vol. 605. pp. 275–280.
- 10. Astaf'ev O., Kavano I., Komiyama S., Gavrilenko V.I., Erofeeva I.V. Response time of the quantum well Hall effect detector in far IR radiation region // Izvestiya

Akademii Nauk. Rossijskaya Akademiya Nauk. Seriya Fizicheskaya, – Vol. 66, – 2002. – pp. 243–246.

- Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T., Komiyama S. Far-infrared spectroscopy of single quantum dots in high magnetic fields // Physical Review B, - Vol. 65, -2002. - P. 085315.
- Astafiev O., Komiyama S., Kutsuwa T., Antonov V., Kawaguchi Y., Hirakawa K. Single-photon detector in the microwave range // Applied physics letters, – Vol. 80, – 2002. – pp. 4250–4252.
- Komiyama S., Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T. Single-photon detection of THz-waves using quantum dots // Microelectronic engineering, – Vol. 63, – 2002.
 – pp. 173–178.
- Komiyama S., Astafiev O., Antonov V., Kutsuwa T. Single-photon detection of THz/GHz-waves using quantum dots // Physics of Semiconductors 2002: Proceedings of the 26th International Conference, Edinburgh, 29 July to 2 August 2002. 2003. P. 221.
- 15. Astafiev Oleg T.K.V.A.S.K. FIR and microwavephoton detection by quantum dots // Journal of Physical Society of Japan. 2003. pp. 102-105.
- Komiyama S., Astafiev O., Machida T. Application of quantum Hall edge channels // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, – Vol. 20, – 2003. – pp. 43–56.
- Astafiev O., Komiyama S. Single-Photon Detection with Quantum Dots in the Far-Infrared/Submillimeter-Wave Range // In: Electron Transport in Quantum Dots. Boston (MA): Springer US, 2003. pp. 363–396.
- Pashkin Y.A., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Tsai J.S. Josephson charge qubits: a brief review // Quantum Information Processing, – Vol. 8, – 2009. – pp. 55–80.

- Likharev K.K., Zorin A.B. Theory of the Bloch-wave oscillations in small Josephson junctions // Journal of low temperature physics, – Vol. 59, – 1985. – pp. 347–382.
- Astafiev O., Pashkin Y., Yamamoto T., Nakamura Y., Tsai J. Recent results in experiments with Josephson qubits // International Journal of Quantum Information, – Vol. 3, – 2005. – pp. 173–196.
- Astafiev O., Nakamura Y., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Tsai J.S. Comment on "charge-qubit operation of an isolated double quantum dot" // Physical review letters, - Vol. 97, - 2006. - P. 208901.
- 22. Im H., Pashkin Y.A., Kim Y., Li T.F., Jung K., Astafiev O., Tsai J.S. Subgap leakage and interface states in superconductor-insulator-superconductor tunnel junctions // Physica C: Superconductivity and its applications, Vol. 470, 2010. pp. S832–S833.
- 23. Im H., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S. Characterization of all-Nb nanodevices fabricated by electron beam lithography and ion beam oxidation // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, – Vol. 25, – 2007. – pp. 448–454.
- 24. Im H., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S. Characterization of ultrasmall all-Nb tunnel junctions with ion gun oxidized barriers // Applied physics letters, – Vol. 88, – 2006. – P. 112113.
- 25. Im H., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S. Fabrication of ultrasmall all-Nb tunnel-junction devices with ion beam-oxidized barriers // Journal of the Korean Physical Society, – Vol. 48, – 2006. – pp. 1560– 1564.
- 26. Pashkin Y.A., Im H., Leppäkangas J., Li T.F., Astafiev O., Abdumalikov Jr A.A., Thuneberg E., Tsai J.S. Charge transport through ultrasmall single and double

Josephson junctions coupled to resonant modes of the electromagnetic environment // Physical Review B, – Vol. 83, – 2011. – P. 020502.

- 27. Nakamura Y., Pashkin Y.A., Tsai J.S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box // Nature, Vol. 398, 1999. pp. 786–788.
- Astafiev O., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Yamamoto T., Tsai J.S. Quantum noise in the Josephson charge qubit // Physical review letters, – Vol. 93, – 2004. – P. 267007.
- Astafiev O., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Yamamoto T., Tsai J.S. Temperature square dependence of the low frequency 1/f charge noise in the Josephson junction qubits // Physical review letters, – Vol. 96, – 2006. – P. 137001.
- Yamamoto T., Nakamura Y., Pashkin Y.A., Astafiev O., Tsai J.S. Parity effect in superconducting aluminum single electron transistors with spatial gap profile controlled by film thickness // Applied physics letters, – Vol. 88, – 2006. – P. 212509.
- 31. Yamamoto T., Watanabe M., You J.Q., Pashkin Y.A., Astafiev O., Nakamura Y., Nori F., Tsai J.S. Spectroscopy of superconducting charge qubits coupled by a Josephson inductance // Physical Review B, – Vol. 77, – 2008. – P. 064505.
- 32. Pashkin Y.A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D.V., Tilma T., Nori F., Tsai J.S. Coherent manipulation of coupled Josephson charge qubits // Physica C: Superconductivity and its applications, – Vol. 426, – 2005. – pp. 1552– 1560.
- 33. Pashkin Y.A., Tilma T., Averin D.V., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Nori F., Tsai J.S. Entanglement of two coupled charge qubits // International Journal of Quantum Information, – Vol. 1, – 2003. – pp. 421–426.
- 34. Pashkin Y.A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D.V., Tsai J.S. Quantum oscillations in two coupled charge qubits // Nature, Vol. 421, 2003. pp. 823-826.

- 35. Pashkin Y., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D., Tsai J.S. Coupling two charge qubits // NEC Research and Development, Vol. 44, 2003. pp. 273–277.
- 36. Pashkin Y.A., Astafiev O., Yamamoto T., Nakamura Y., Averin D.V., Tilma T., Nori F., Tsai J.S. Quantum coherent dynamics of two coupled superconducting charge qubits // Quantum Informatics 2004. 2005. Vol. 5833. pp. 116–126.
- 37. Tsai J.S., Yamamoto T., Pashkin Y.A., Astafiev O., Nakamura Y. Coupled Josephson quantum bits // Noise and Information in Nanoelectronics, Sensors, and Standards II. 2004. Vol. 5472. pp. 11–18.
- Yamamoto T., Pashkin Y.A., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S. Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits // Nature, – Vol. 425, – 2003. – pp. 941–944.
- Astafiev O., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Nakamura Y., Tsai J.S. Single-shot measurement of the Josephson charge qubit // Physical Review B, - Vol. 69, -2004. - P. 180507.
- Shnirman A., Schön G., Martin I., Makhlin Y. Low-and high-frequency noise from coherent two-level systems // Physical review letters, - Vol. 94, - 2005. - P. 127002.
- 41. Peltonen J.T., Coumou P.C.J.J., Peng Z.H., Klapwijk T.M., Tsai J.S., Astafiev O.V. Hybrid rf SQUID qubit based on high kinetic inductance // Scientific reports, Vol. 8, 2018. P. 10033.
- 42. Antonov I.V., Shaikhaidarov R.S., Antonov V.N., Astafiev O.V. Superconducting 'twin'qubit // Physical Review B, Vol. 102, 2020. P. 115422.
- 43. Dmitriev A.Y., Astafiev O.V. A perspective on superconducting flux qubits // Applied Physics Letters, Vol. 119, 2021. P. 080501.
- 44. Omelyanchouk A.N., Shevchenko S.N., Greenberg Y.S., Astafiev O., Il'ichev E. Quantum behavior of a flux qubit coupled to a resonator // Low Temperature Physics, Vol. 36, 2010. pp. 893–901.

- 45. Bourassa J., Gambetta J.M., Abdumalikov Jr A.A., Astafiev O., Nakamura Y., Blais A. Ultrastrong coupling regime of cavity QED with phase-biased flux qubits // Physical Review A, Vol. 80, 2009. P. 032109.
- 46. Abdumalikov Jr A.A., Astafiev O., Nakamura Y., Pashkin Y.A., Tsai J. Vacuum Rabi splitting due to strong coupling of a flux qubit and a coplanar-waveguide resonator // Physical review b, – Vol. 78, – 2008. – P. 180502.
- 47. Oelsner G., Van Der Ploeg S.H.W., Macha P., Hübner U., Born D., Anders S., Il'ichev E., Meyer H.G., Grajcar M., Wünsch S., others. Weak continuous monitoring of a flux qubit using coplanar waveguide resonator // Physical Review B, - Vol. 81, - 2010. - P. 172505.
- 48. Peng Z.H., Ding J.H., Zhou Y., Ying L.L., Wang Z., Zhou L., Kuang L.M., Liu Y.X., Astafiev O.V., Tsai J.S. Vacuum-induced Autler-Townes splitting in a superconducting artificial atom // Physical Review A, Vol. 97, 2018. P. 063809.
- Shulga K.V., Il'ichev E., Fistul M.V., Besedin I.S., Butz S., Astafiev O.V., Hübner U., Ustinov A.V. Magnetically induced transparency of a quantum metamaterial composed of twin flux qubits // Nature communications, Vol. 9, 2018. P. 150.
- Stafiev O., Inomata K., Niskanen A.O., Yamamoto T., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. Single artificial-atom lasing // Nature, Vol. 449, 2007. pp. 588–590.
- 51. Oelsner G., Macha P., Astafiev O.V., Il'ichev E., Grajcar M., Hübner U., Ivanov B.I., Neilinger P., Meyer H.G. Dressed-state amplification by a single superconducting qubit // Physical review letters, Vol. 110, 2013. P. 053602.
- 52. Sokolova A.A., Fedorov G.P., Il'ichev E.V., Astafiev O.V. Single-atom maser with an engineered circuit for population inversion // Physical Review A, – Vol. 103, – 2021. – P. 013718.

- 53. Peng Z.H., Liu Y.X., Peltonen J.T., Yamamoto T., Tsai J.S., Astafiev O. Correlated emission lasing in harmonic oscillators coupled via a single three-level artificial atom // Physical review letters, – Vol. 115, – 2015. – P. 223603.
- 54. Astafiev O., Zagoskin A.M., Abdumalikov Jr A.A., Pashkin Y.A., Yamamoto T., Inomata K., Nakamura Y., Tsai J.S. Resonance fluorescence of a single artificial atom // Science, – Vol. 327, – 2010. – pp. 840–843.
- 55. Dmitriev A.Y., Korenkov A., Astafiev O.V. Scattering spectroscopy of a superconducting artificial atom coupled to two half spaces // JETP letters, – Vol. 105, – 2017. – pp. 110–113.
- 56. Astafiev O.V., Abdumalikov Jr A.A., Zagoskin A.M., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. Ultimate on-chip quantum amplifier // Physical review letters, Vol. 104, 2010. P. 183603.
- 57. Abdumalikov Jr A.A., Astafiev O., Zagoskin A.M., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. Electromagnetically induced transparency on a single artificial atom // Physical review letters, – Vol. 104, – 2010. – P. 193601.
- Zhou Y., Peng Z., Horiuchi Y., Astafiev O.V., Tsai J.S. Tunable microwave single-photon source based on transmon qubit with high efficiency // Physical Review Applied, - Vol. 13, - 2020. - P. 034007.
- 59. Peng Z.H., De Graaf S.E., Tsai J.S., Astafiev O.V. Tuneable on-demand single-photon source in the microwave range // Nature communications, Vol. 7, 2016.
 P. 12588.
- 60. Manninen A.J., Kemppinen A., Lehtinen J., Mykkänen E., Amato G., Enrico E., Lacquaniti V., Kataoka M., Lindström T., Dolata R., et al. Towards measurement and control of single-photon microwave radiation on chip // 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC). 2015. pp. 1–1.
- Korenkov A., Dmitriev A., Astafiev O. Measurement system of correlation functions of microwave single photon source in real time // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1936. P. 020008.

- 62. Zhou Y., Peng Z., Horiuchi Y., Astafiev O.V., Tsai J.S. Efficient Tunable Microwave Single-photon Source Based on Transmon Qubit // 2019 IEEE International Superconductive Electronics Conference (ISEC). 2019. pp. 1–3.
- 63. Lubsanov V., Gurtovoi V., Semenov A., Glushkov E., Antonov V., Astafiev O. Materials for a broadband microwave superconducting single photon detector // Superconductor Science and Technology, – Vol. 35, – 2022. – P. 105013.
- 64. Dmitriev A.Y., Shaikhaidarov R., Antonov V.N., Hönigl-Decrinis T., Astafiev O.V. Quantum wave mixing and visualisation of coherent and superposed photonic states in a waveguide // Nature communications, Vol. 8, 2017. P. 1352.
- 65. Dmitriev A.Y., Shaikhaidarov R., Hönigl-Decrinis T., De Graaf S.E., Antonov V.N., Astafiev O.V. Probing photon statistics of coherent states by continuous wave mixing on a two-level system // Physical Review A, Vol. 100, 2019. P. 013808.
- 66. Pogosov W.V., Dmitriev A.Y., Astafiev O.V. Effects of photon statistics in wave mixing on a single qubit // Physical Review A, Vol. 104, 2021. P. 023703.
- 67. Vasenin A.V., Dmitriev A.Y., Kadyrmetov S.V., Bolgar A.N., Astafiev O.V. Dynamics of multiphoton scattering in a two-level mixer // Physical Review A, – Vol. 106, – 2022. – P. L041701.
- Vasenin A., Dmitriev A., Kadyrmetov S., Astafiev O. Simulation and design of a superconducting qubit for the quantum wave mixing experiment // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2241. P. 020036.
- Hönigl-Decrinis T., Antonov I.V., Shaikhaidarov R., Antonov V.N., Dmitriev A.Y., Astafiev O.V. Mixing of coherent waves in a single three-level artificial atom // Physical Review A, Vol. 98, 2018. P. 041801.
- 70. Wallraff A., Schuster D.I., Blais A., Frunzio L., Huang R.S., Majer J., Kumar S., Girvin S.M., Schoelkopf R.J. // Nature, – Vol. 431, – 2004. – P. 162.

- 71. Abdumalikov Jr A.A., Astafiev O.V., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. Dynamics of coherent and incoherent emission from an artificial atom in a 1D space // Physical review letters, – Vol. 107, – 2011. – P. 043604.
- 72. Li T.F., Pashkin Y.A., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S., Im H. High-frequency metallic nanomechanical resonators // Applied Physics Letters, Vol. 92, 2008.
 P. 043112.
- 73. Li T.F., Pashkin Y.A., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J.S., Im H. Low-frequency charge noise in suspended aluminum single-electron transistors // Applied Physics Letters, – Vol. 91, – 2007. – P. 033107.
- 74. Hoehne F., Pashkin Y.A., Astafiev O., Faoro L., Ioffe L.B., Nakamura Y., Tsai J.S. Damping in high-frequency metallic nanomechanical resonators // Physical Review B, Vol. 81, 2010. P. 184112.
- 75. Pashkin Y.A., Li T.F., Pekola J.P., Astafiev O., Knyazev D.A., Hoehne F., Im H., Nakamura Y., Tsai J.S. Detection of mechanical resonance of a single-electron transistor by direct current // Applied Physics Letters, – Vol. 96, – 2010. – P. 263513.
- 76. Pashkin Y.A., Pekola J.P., Knyazev D.A., Li T.F., Kafanov S., Astafiev O., Tsai J.S. Single-electron devices with a mechanical degree of freedom // Journal of Physics: Conference Series. 2012. Vol. 400. P. 052028.
- 77. Harrabi K., Pashkin Y.A., Astafiev O.V., Kafanov S., Li T.F., Tsai J.S. Fabrication and characterization of Al nanomechanical resonators for coupling to nanoelectronic devices // Applied Physics A, – Vol. 108, – 2012. – pp. 7–11.
- 78. Bolgar A.N., Zotova J.I., Kirichenko D.D., Besedin I.S., Semenov A.V., Shaikhaidarov R.S., Astafiev O.V. Quantum regime of a two-dimensional phonon cavity // Physical Review Letters, – Vol. 120, – 2018. – P. 223603.
- 79. Bolgar A.N., Sanduleanu S.V., Strelnikov A., Astafiev O.V. High Quality Quasinormal Modes of Phononic Crystals for Quantum Acoustodynamics // Journal of Low Temperature Physics, – Vol. 210, – 2023. – pp. 573–587.

- 80. Bolgar A.N., Kirichenko D.D., Shaikhaidarov R.S., Sanduleanu S.V., Semenov A.V., Dmitriev A.Y., Astafiev O.V. A phononic crystal coupled to a transmission line via an artificial atom // Communications Physics, Vol. 3, 2020. P. 207.
- 81. Zeng G.H., Zhang Y., Bolgar A.N., He D., Li B., Ruan X.H., Zhou L., Kuang L.M., Astafiev O.V., Liu Y.X., others. Quantum versus classical regime in circuit quantum acoustodynamics // New Journal of Physics, Vol. 23, 2021. P. 123001.
- Astafiev O.V., Ioffe L.B., Kafanov S., Pashkin Y.A., Arutyunov K.Y., Shahar D., Cohen O., Tsai J.S. Coherent quantum phase slip // Nature, – Vol. 484, – 2012. – pp. 355–358.
- Peltonen J.T., Astafiev O.V., Korneeva Y.P., Voronov B.M., Korneev A.A., Charaev I.M., Semenov A.V., Golt'Sman G.N., Ioffe L.B., Klapwijk T.M., others. Coherent flux tunneling through NbN nanowires // Physical Review B, – Vol. 88, – 2013. – P. 220506.
- 84. Peltonen J.T., Peng Z.H., Korneeva Y.P., Voronov B.M., Korneev A.A., Semenov A.V., Gol'tsman G.N., Tsai J.S., Astafiev O.V. Coherent dynamics and decoherence in a superconducting weak link // Physical Review B, Vol. 94, 2016. P. 180508.
- 85. De Graaf S.E., Skacel S.T., Hönigl-Decrinis T., Shaikhaidarov R., Rotzinger H., Linzen S., Ziegler M., Hübner U., Meyer H.G., Antonov V., et al. Charge quantum interference device // Nature Physics, – Vol. 14, – 2018. – pp. 590–594.
- 86. Shaikhaidarov R.S., Kim K.H., Dunstan J.W., Antonov I.V., Linzen S., Ziegler M., Golubev D.S., Antonov V.N., Il'ichev E.V., Astafiev O.V. Quantized current steps due to the ac coherent quantum phase-slip effect // Nature, Vol. 608, 2022. pp. 45–49.