

На правах рукописи
УДК 539.12

Федоров Глеб Петрович

Моделирование квантового взаимодействия излучения и
вещества с использованием массивов сверхпроводниковых
искусственных атомов

01.04.07 — физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Долгопрудный — 2021

Работа прошла апробацию в лаборатории искусственных квантовых систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Рязанов Валерий Владимирович,
доктор физико-математических наук,
профессор МФТИ

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ РАН)

Защита состоится « » сентября 2021 года в 16:00 на заседании диссертационного совета ЛФИ.01.04.07.007 по адресу: 141801, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Работа представлена « » мая 2021 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1. ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность работы. История развития сверхпроводниковых искусственных атомов, или кубитов, как инструмента для наблюдения макроскопических квантовых эффектов берет своё начало в 1997 году, когда в группе проф. Накамуры в Японии была впервые показана [1] когерентность суперпозиции зарядовых состояний одноэлектронного транзистора. Этот эксперимент стал толчком к развитию новой области физики, интерес к которой обеспечивался как открывшимися возможностями изучать фундаментальные физические явления, так и потенциальной применимостью для квантовых вычислений.

Несмотря на относительно недавнее появление, сверхпроводниковые, или джозефсоновские кубиты, как их также называют, прошли много стадий в своем развитии. Системы, использовавшиеся в первых экспериментах, имели очень низкие времена когерентности: например, в работе [2] время затухания Раби-осцилляций в зарядовом кубите составило около 1 нс. Сейчас рекордные времена когерентности составляют порядка 100 микросекунд [3]. Наиболее далеко в области квантовых вычислений продвинулись американские учёные, работающие теперь в компаниях Google и IBM. В частности, в 2019 году Google продемонстрировали [4] квантовое превосходство своего процессора из 53 кубитов над мощнейшим существующим классическим компьютером. Однако даже этот результат пока ещё далёк от реальных практических применений, так как количество ошибок, происходящих в устройстве, по-прежнему еще очень велико, а решаемая задача была создана искусственно для минимизации чувствительности результата к декогеренции. Как было показано еще Шором в XX веке [5], практические квантовые вычисления потребуют реализации алгоритмов коррекции ошибок, что неминуемо потребует существенного увеличения числа физических кубитов для обеспечения работы небольшого числа логических. Увеличение числа кубитов более, чем на порядок, непременно натолкнётся на трудности масштабирования контролирующей электроники и криогенной аппаратуры [6], алгоритмов калибровки системы [4, 7], а также проектирования самих сверхпроводящих интегральных схем [8]. Отсюда следует, что сегодня нельзя назвать

даже примерных сроков реализации полезных квантовых алгоритмов [4].

Однако острый интерес к потенциальным применениям в области квантовых вычислений мотивировал исследования на основе сверхпроводящих кубитов и по другим направлениям [3]. В частности, чрезвычайно большое количество экспериментов было проведено в области квантовой электродинамики цепей [9], вдохновленной нобелевскими исследованиями Гароша [10] по стандартной квантовой электродинамике полостей. Впервые сверхпроводниковый искусственный атом был сильно связан (strongly coupled) с квантованным полем в резонаторе в 2004 году в Йельском университете [11], что стало первым в истории экспериментальным подтверждением возможности связать одиночную квантовую систему с полем так, чтобы сила связи превысила диссипацию. С развитием технологии производства алюминиевых сверхпроводниковых чипов, открытием новых схем расположения их элементов, а также уществлением электроники все больше групп в мире стали включаться в работу и вести собственные исследования. В Йельском университете работают проф. Деворе (Michel Devoret) и проф. Шелькопф (Robert Schoelkopf), занимающиеся в основном экспериментами с неклассическими состояниями света в микроволновых резонаторах, которые они готовят, используя связанные с ними искусственные атомы (см. [12, 13]). В этой группе также берут начало известные работы компании IBM (см. [14]), а также стартап Rigetti, по фамилии одного из защитившихся в Йельском университете аспирантов [15]. В группе проф. Мартиниса (John Martinis) в университете Калифорнии, Санта Барбара, помимо обширной работы по развитию квантовых алгоритмов [4], проводились исследования многочастичной локализации [16, 17], квантового хаоса. В группе проф. Сиддики (Irfan Siddiqi), университет Калифорнии, Бёркли, проводятся эксперименты по наблюдению и изучению отдельных квантовых траекторий и квантовых скачков, которые испытывает кубит под воздействием сильных или слабых измерений (см. [18] и ссылки там же). Проф. Астафьев, работавший в Японии и затем в Англии, провёл первые эксперименты по взаимодействию свободного излучения в волноводах с джозефсоновскими кубитами [19]. В Дельфтском университете под руководством проф. Ди Карло (Leonardo Di Carlo) проводились одни из первых эксперимен-

тов по реализации квантовых алгоритмов на двухкубитных схемах, а затем изучалась возможность цифрового моделирования произвольных гамильтонианов [20]. Наконец, в группе проф. Вальрафа (Andreas Wallraff) проводятся эксперименты с одиночными микроволновыми фотонами, например, по созданию источника последовательности перепутанных друг с другом фотонов [21] или использовать одиночные летящие фотоны для перепутывания удаленных кубитов [22].

Как можно видеть, с течением времени обнаружился обширный перечень областей применения сверхпроводниковых квантовых систем, без которых все приведенные выше эксперименты были бы невозможны. Исследования, описанные в данной диссертации, посвящены экспериментальной реализации взаимодействия излучения и вещества в квантовом режиме при помощи сверхпроводниковых искусственных атомов. Данная тема лежит за пределами области цифровых квантовых вычислений и скорее оказывается ближе к аналоговому моделированию одних квантовых систем другими в духе изначального предложения Фейнмана [23]. Известно, что системы связанных кубитов позволяют экспериментально реализовывать симуляторы спиновых массивов в квантовом режиме, что пытается использовать в своих машинах компания DWave (см, например, [24]): однозначное отображение спинового гамильтониана на экспериментальный образец дает надежду на то, что измерение параметров физической системы позволит найти положение минимума энергии в пространстве конфигураций модельного гамильтониана. Подобным образом в ходе мировых исследований было выявлено, что системы связанных многоуровневых трансмонов подходят для аналогового моделирования гамильтониана Бозе-Хаббарда [25–30]. Такое соответствие открывает целое направление экспериментальных исследований, так как по сути соединяет сверхпроводниковые системы с различными областями теоретической и экспериментальной физики, использующими одну и ту же математическую модель.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование возможности аналогового моделирования взаимодействия излучения и вещества при помощи квантовых сверхпроводниковых устройств, теоре-

тическое и экспериментальное, а также поиск и описание новых эффектов возникающих при таком взаимодействии.

Для достижения поставленной цели в ходе исследований были сформулированы следующие задачи:

1. создание экспериментальной базы для исследования сверхпроводниковых систем
2. измерение однокубитных образцов с целью контроля и улучшения их характеристик при фабрикации
3. численное моделирование системы двух связанных трансмонов, создание технологических чертежей
4. экспериментальное исследование образца, изготовленного по созданным чертежам, сопоставление результатов с теоретической моделью
5. численное моделирование цепочки, состоящей из пяти трансмонов, создание технологических чертежей
6. экспериментальное исследование образца, сопоставление предсказаний модели и полученных данных

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана программно-инструментальная база для работы со сверхпроводниковыми квантовыми устройствами с использованием автоматизации измерений при помощи методов компьютерного зрения.
2. Разработана и исследована экспериментально система из двух связанных трансмонов, построена квантовомеханическая модель, объясняющая наблюдаемые спектральные линии и предсказывающая эффекты взаимодействия системы и падающего на нее излучения
3. Разработана и экспериментально исследована цепочка из пяти трансмонов, моделирующая фотонный транспорт через гамильтониан

Бозе-Хаббарда, связанный с резервуарами на его краях; построена теоретическая модель, позволяющая численно рассчитать неравновесную динамику с учетом диссипации и внешнего вынуждения и предсказывающая спектральные свойства системы; показан переход от классического линейного режима к нелинейному, квантовому режиму работы системы с увеличением мощности падающего излучения

Научная новизна исследований. Впервые были применены методы машинного зрения к задаче автоматизации измерений сверхпроводниковых квантовых устройств, что позволило проводить полный цикл экспериментов с однокубитными образцами без участия оператора

Впервые проведен полный и подробный анализ спектральных переходов в системе двух связанных трансмонов, впервые были обнаружены необычные проявления гибридизации излучения и вещества в составной системе, значительно изменяющие структуру энергетических уровней системы

Впервые был продемонстрирован транспорт фотонов в квантовом режиме через цепочку из пяти связанных трансмонов, впервые показан переход от классического режима транспорта к квантовому режиму фотонной блокады; продемонстрированы многофотонные переходы на многочастичные возбужденные состояния, точно предсказанные теоретическим расчетом.

Научная и практическая значимость работы. Исследование сложных квантовых систем представляет огромную значимость для современной науки и техники. Находясь на переднем крае физики, исследования по созданию и контролю многочастичных квантовых систем могут в конечном итоге привести к созданию практически полезных макроскопических квантовых устройств, которые найдут применение в решении задач материаловедения, машинного обучения, оптимизации и криптографии. Принципиальная сложность численного расчета квантовой системы, выражаясь в экспоненциальном росте гильбертова пространства состояний с увеличением числа её подсистем, является с одной стороны про-

блемой, а с другой стороны – возможностью, которую современной науке требуется использовать в своих целях. Эксперименты, проведенные автором в рамках данной диссертации подтверждают, что контроль небольших по размеру систем возможен, и применение их для моделирования известных гамильтонианов действительно имеет перспективы. Исследования и методики, описанные в диссертации, будут служить основой для дальнейшего увеличения числа кубитов на образце, совершенствования архитектуры чипов, масштабирования измерительных установок и поиска новых применений и задач, для которых возможно будет использовать сверхпроводниковые квантовые технологии.

Апробация работы.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ. Из них 8 статей в журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Основные результаты, изложенные в данной диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Во всех случаях заимствования материалов других авторов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается соответствием между моделированием, аналитическими результатами и непосредственно полученными экспериментальными данными. Экспериментальные методы, использованные автором, широко применяются в мировом научном сообществе, в работе приводятся соответствующие ссылки на печатные работы. Точность экспериментальных данных обеспечивается заводской калибровкой использованного коммерчески доступного оборудования.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она изложена на 184 страницах машинописного текста, включает 36 рисунков и 4 таблицы. Список литературы насчитывает

247 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, указаны ее цели, научная новизна, практическая значимость, структура и объем.

Первая глава диссертации представляет собой широкий историко-литературный обзор тем, составляющих фундамент проведенных автором исследований. Описаны на продвинутом уровне основы квантовой механики применительно к квантованию произвольных электрических цепей на примере планковского оциллятора, рассмотрены в этом контексте вопросы канонических преобразований и теории представлений. Также дан исторический обзор развития математического аппарата и физического понимания принципов квантовой механики по оригинальным работам. В качестве демонстрации применения теории Деворе к составлению лагранжианов цепей разобраны некоторые нетривиальные конфигурации элементов, приводящие к не поддающимся численному решению уравнениям Шредингера.

Далее в историческом контексте рассматриваются эффекты сверхпроводимости и эффект Джозефсона. Приводится подробный обзор литературы в хронологическом порядке, от теории Лондонов до теории БКШ, показываются проблемы и пути их решения, важнейшие экспериментальные результаты, альтернативные теории, не получившие дальнейшего развития. Показан путь открытия эффекта Джозефсона, показаны трудности при установлении туннельного слагаемого гамильтонiana для электронов, приведен краткий анализ математического аппарата и строгих результатов для критического тока стационарного эффекта и вывода уравнения нестационарного.

Затем освещается исторический путь открытия явления макроскопического туннелирования, или квантовой динамики переменной ϕ – разности фаз конденсаторов на берегах джозефсоновского перехода. Показан анализ RCSJ-модели джозефсоновского перехода, его классического уравнения движения, описаны результаты Деворе, Мартиниса и Клар-

ка в эксперименте по наблюдению квантового туннелирования системы из связанного состояния в потенциале стиральной доски. Освещены возникшие в то время вопросы касательно диссипации и её влияния на динамику системы, её зависимости от температуры и связь с текущими успехами в изготовлении кубитов с большими временами когерентности.

Наконец, дается очерк развития области когерентных квантовых систем на основе сверхпроводниковых электрических цепей с джозефсоновскими переходами. Эта область, рожденная на заре XXI века, в силу своей новизны имеет огромный потенциал для научных открытий, начиная прикладными результатами, как, например, квантовые вычисления, так и фундаментальными, как решение вопросов перехода от микроскопической квантовой физики к классическому миру, природы декогеренции, и даже экспериментальных проверок теорий квантовой гравитации и обнаружения гипотетических частиц темной материи. Действительно, эта новая область требует использования наработок из широчайшего круга областей научного знания, являясь беспрецедентным примером совмещения передовых методов наноэлектроники, криогенной техники сверхнизких температур, классической теории информации, теории разработки сложных высокоуровневых программных систем, низкоуровневого программирования и схемотехники, теоретической механики, СВЧ-электродинамики, квантовой механики и электродинамики, квантовой теории информации, материаловедения, физики твердого тела и сверхпроводимости. Так как область пока находится на относительно ранней стадии развития и требует больших финансовых вложений, она обладает существенным запасом интересных физических проблем, на решение которых не хватает времени у мировых лидеров, ориентированных, главным образом, на реализацию квантовых вычислений. Это означает, что можно создавать новые экспериментальные лаборатории для исследования сверхпроводниковых квантовых систем и получать на выходе качественные фундаментальные работы и – естественным образом – многопрофильных ученых-экспериментаторов, заинтересованных в поиске естественно-научных истин.

Так как в литературе – в том числе, в многочисленных иностранных кандидатских диссертациях – базовая теория представлена достаточно

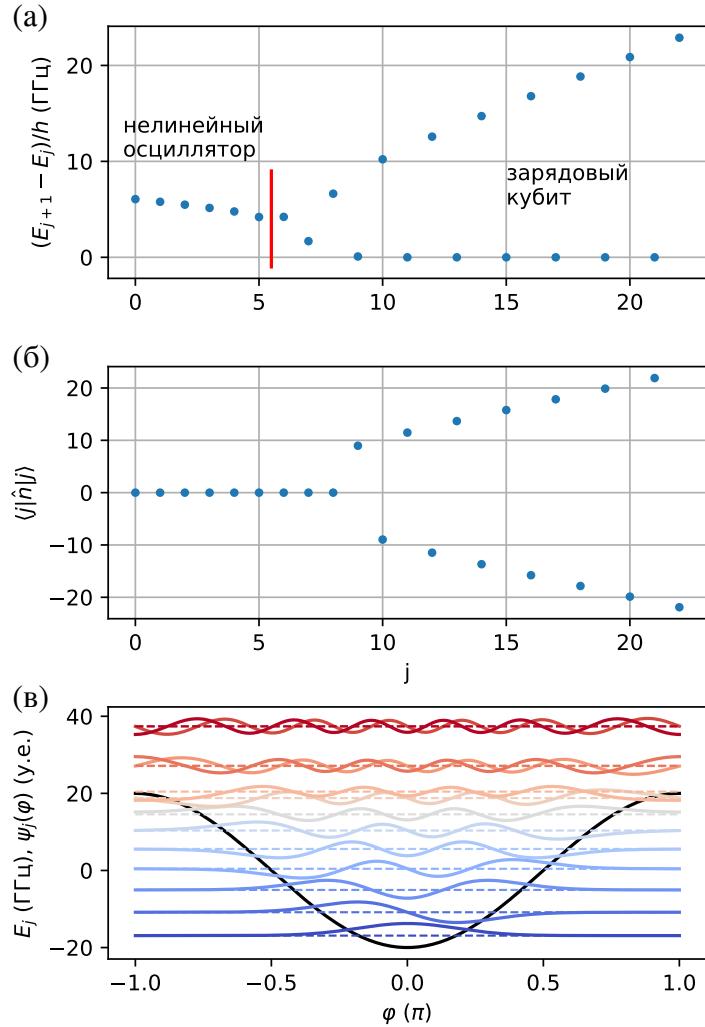


Рис. 1: (а) Разности энергий последовательных собственных состояний трансмона для $E_C/h = 250$ МГц, $E_J/h = 20$ ГГц. По линейному росту в правой части можно идентифицировать квадратичный закон дисперсии. (б) Переход от локализации к делокализации в фазовом базисе происходит при данных параметрах при $j = 9$. (в) Волновые функции собственных состояний в фазовом представлении. Ноль каждой из $\psi_j(\varphi)$ смещен на величину соответствующей энергии E_j .

полно, чтобы избежать повторений автор дает лишь краткое, минимально необходимое для перехода к основной части работы, описание квантовомеханических свойств кубитов-трансмонов в связи с рассмотренными вопросами построения уравнений Джозефсона. В связи с текущими исследованиями примерения трансмонов для моделирования систем Бозе-Хаббарда (Б-Х), на Рис. 1 приведены графики, по мнению автора, полезные для понимания границ соответствия между трансмоном и нелинейным осциллятором. Хорошо видно, что при некотором j – номере собственного состояния – поведение разности ближайших уровней испытывает качественное изменение, что означает переход от состояний

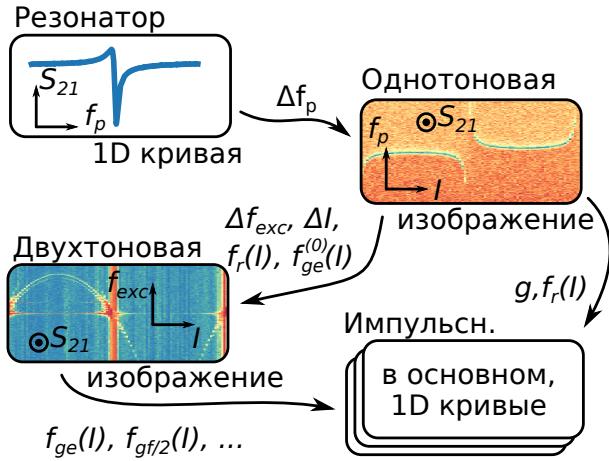


Рис. 2: Схематическое изображение последовательности измерений при экспериментах с образцами квантовой электродинамики цепей со считыванием через резонатор в дисперсионном режиме.

осцилляторного типа к состояниями с определенным зарядом. Таким образом, для моделирования гамильтонианов типа Б-Х желательно использовать трансмоны с пониженным ангармонизмом, у которых внутри синусоидального джозефсоновского потенциала будет помещаться больше состояний [31]. Это также даст дополнительную защиту от зарядового шума за счет еще большего, чем у трансмона, понижения зарядовой дисперсии.

Вторая глава посвящена разработанным автором методам автоматизации эксперимента и оригинальным алгоритмам машинного зрения для автоматической обработки экспериментальных данных при последовательной калибровке физических параметров образца.

В первой части описано экспериментальное оборудование, его ориентировочная стоимость и характеристики, кратко дан принцип работы с приборами через различные программные интерфейсы. Приведен анализ того, какие интерфейсы и форм-факторы лучше использовать в дальнейшем при построении более сложных экспериментов. В качестве примера использования программного кода для управления экспериментом, описана процедура измерения времен когерентности однокубитных образцов и приведены ссылки на исходный код, написанный автором и хранящийся в открытом доступе на сайте GitHub [32].

Во второй части более подробно рассматривается эксперимент по однотоновой микроволновой спектроскопии в архитектуре квантовой элек-

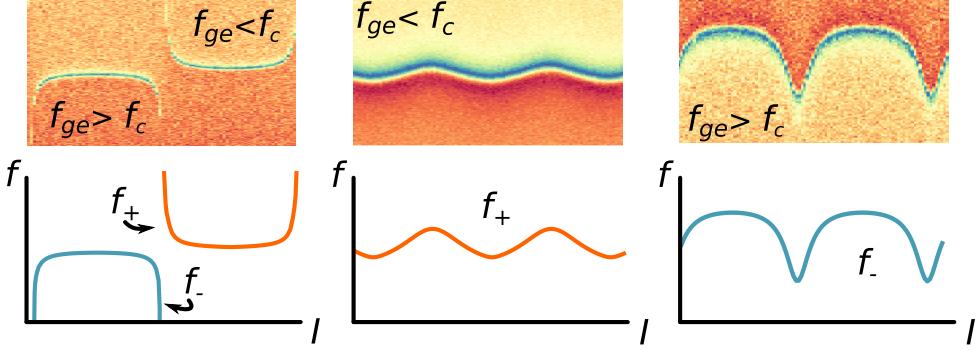


Рис. 3: Желаемые результаты работы алгоритма при распознавании трех случаев однотоновой спектроскопии

тродинамики цепей – второй шаг на Рис. 2. Для трансмона, связанного с резонатором емкостным образом, частоты на первое и второе возбужденные состояния модели Джейнса-Каммингса будут записываться как

$$f_{\pm}(I) \equiv f_r(I) = \frac{f_c + f_{ge}(I)}{2} \pm \sqrt{g^2 + (f_{ge}(I) - f_c)^2/4}, \quad (1)$$

где $f_r(I) = f_c$ (частоте резонатора), когда сила связи $g = 0$, а $f_{ge}(I)$ – частота кубитного перехода трансмона – выражается как

$$f_{ge}(I) = f_{ge}^{\max} \left[\cos^2 \left(\frac{\pi(I - I_{ss})}{\Pi} \right) + d^2 \sin^2 \left(\frac{\pi(I - I_{ss})}{\Pi} \right) \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (2)$$

где I, I_{ss}, Π – это ток, управляющий потоком в СКВИДе трансмона, ток верхней оптимальной точки, период по потоку, а f_{ge}^{\max} , d – частота трансмона в оптимальной точке и асимметрия СКВИДа. Проблема состоит в обнаружении частот $f_{\pm}(I)$ на экспериментальных спектрах, как показано на Рис. 3.

Автор предложил и реализовал подход на основе метода максимального правдоподобия, который позволяет качественно аппроксимировать экспериментальные данные модельными кривыми. Трудность задача представляется главным образом потому, что модель для случая квазипересечений является разрывной, что делает невозможным прямое применение стандартных методов оптимизации, если заранее неизвестно, какой именно случай из Рис. 3 будет встречен алгоритмом. Также из-за наличия шума в данных и полном отсутствии информации о начальном приближении требовалось обеспечить дополнительную устойчивость алгоритма

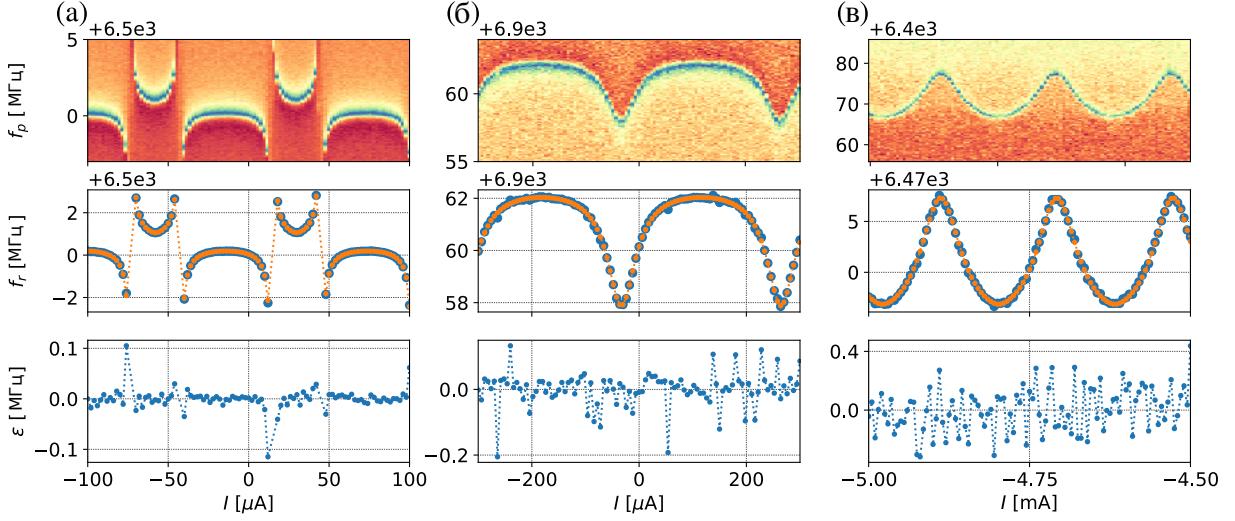


Рис. 4: Результаты работы алгоритма на трех экспериментальных наборах данных, выбранных в качестве примера из нашей базы данных. В верхнем ряду показаны исходные изображения. В среднем ряду построены данные (синие точки) и аппроксимированная модель (соединенные оранжевые точки). В нижнем ряду показаны разности между моделью и данными. Среднеквадратичное отклонение на точку равно: (а) 30 кГц для квазипересечения; (б) 60 кГц для кубита над резонатором; (в) 150 кГц для кубита под резонатором.

путем добавления нескольких промежуточных шагов для аналитического определения периода Π и положения оптимальной точки I_{ss} .

Результаты работы алгоритма представлены на Рис. 4. Исходный код программы интегрирован в измерительную библиотеку и также хранится в открытом доступе, файл lib2/fulaut/AnticrossingOracle.py [32]. Проведены исследование точности опосредованного определения параметров кубита через ММП, проверка устойчивости алгоритма к шуму, профилирование для определения узких мест производительности.

В третьей части автором описывалась оригинальная процедура обработки данных двухтоновой спектроскопии. На вход алгоритм должен получать экспериментальный двухтоновый спектр и начальное приближение на основе однотоновых измерений, а на выходе давать параметры спектральных линий трансмона, включая как однофотонные, так и многофотонные переходы, как показано на Рис. 5 (а). Для того, чтобы алгоритм можно было применять в реальных условиях, он должен был уверенно работать при наличии различных осложняющих факторов, см. Рис. 5 (б).

Автором была разработана и программная реализация алгоритма на языке Python, которая также была интегрирована в основной измери-

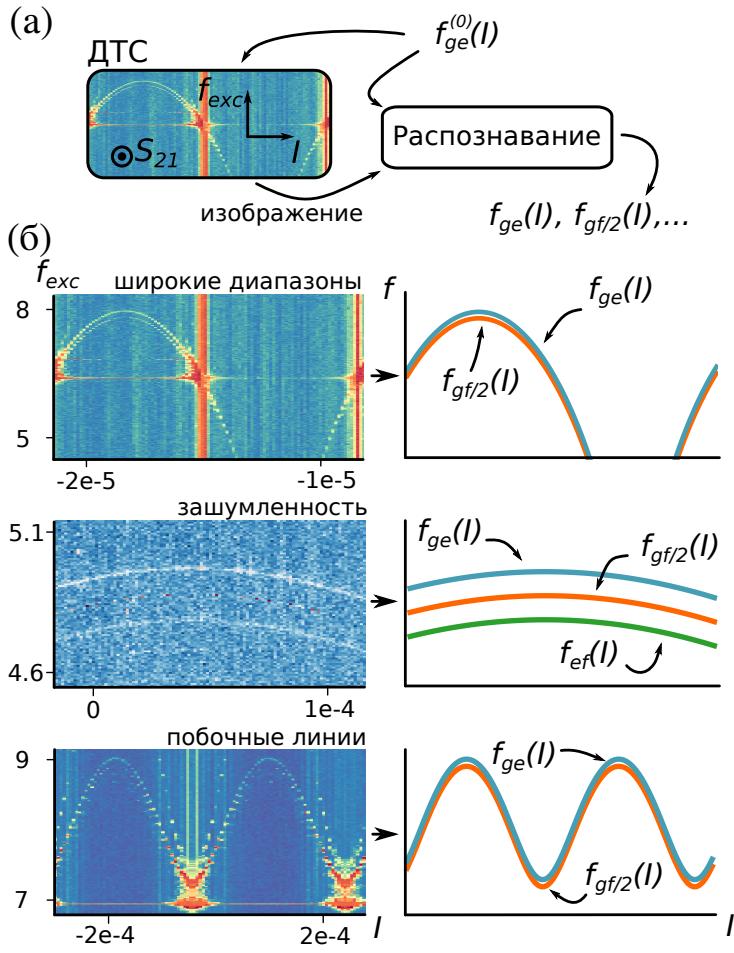


Рис. 5: (а) Схематическое изображение принципа анализа результатов ДТС. Приблизительная зависимость частоты кубита $f_{ge}^{(0)}(I)$ от тока служит как для задания области сканирования, так и в качестве начального приближения для алгоритма распознавания. (б) Примеры желаемой работы алгоритма на различных типах данных.

тельных код, файл lib2/fulaut/SpectrumOracle.py [32]. Идея алгоритма для решения поставленной проблемы многомодельной оптимизации была построена на комбинации преобразования Хафа и алгоритма RANSAC. После извлечения положений пиков (локальных максимумов) из двумерных разверток спектроскопии, алгоритму требуется отделить правильные кривые от неизбежно проникающих в силу большого динамического диапазона полезных данных шумовых точек. Схематически предложенная автором процедура изображена на Рис. 6. Для исключения шума производится несколько полных переборов параметров модели, причем для расчета функции потерь берутся только ближайшие к кривой точки из окна определенной ширины по частоте около неё. Таким образом полностью исключается влияние далеких точек на оценку качества аппроксимации. Затем осуществляется сортировка кривых одновременно

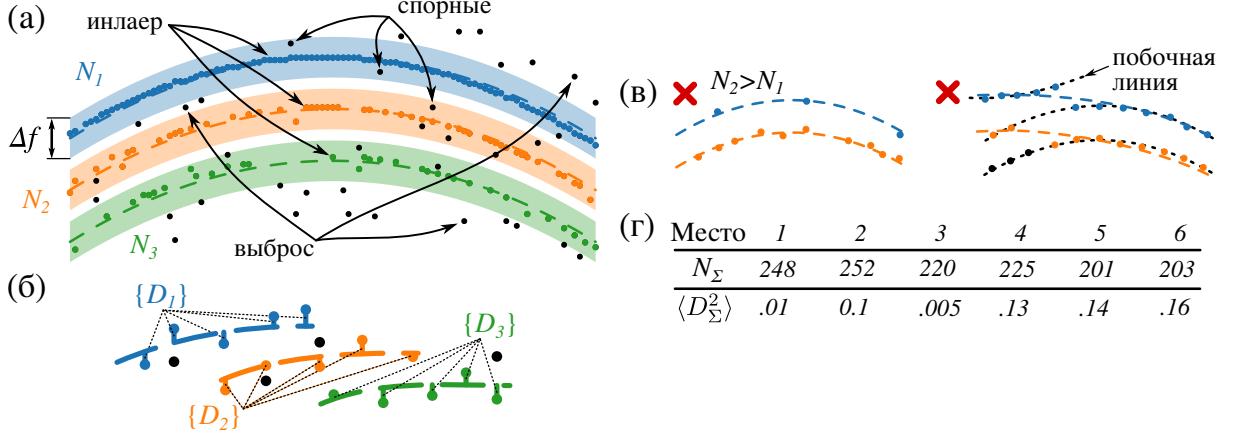


Рис. 6: (а) Вокруг каждой модельной кривой берется симметричный интервал частот шириной Δf (выделенные цветом области). Для каждого тока точки вне интервала называются выбросами; из остальных выбирается единственная (ближайшая к модели) точка из интервала – инлаер, оставшиеся – спорные. (б) По инлаерам для каждой модели вычисляются среднеквадратичные расстояния $\{D_{1-3}\}$. (в) Дополнительные условия. На основной линии кубита не должно быть меньше точек, чем на какой-либо из побочных; максимизация числа точек не должна происходить за счет ухудшения качества аппроксимации. (г) Иллюстрация сортировки найденных перебором решений. В первую очередь учитывается число точек, затем среднеквадратичное отклонение данных от модели.

по количеству точек-инлаеров и среднеквадратичному их отклонению, что возможно сделать, если ранжировать кривые по второму параметру в группах с близкими числами точек (различие по количеству точек не должно, например, превышать 10% от числа уникальных значений горизонтальной координаты массива точек). Далее осуществляется одновременная численная аппроксимация всех моделей к инлаерам алгоритмом Нельдера-Мида, завершая определение параметров кривой.

Результаты работы алгоритма на 16 примерах экспериментальных данных из реальной базы экспериментальны данных, полученных автором, показаны на Рис. 7. Никакие параметры алгоритма не варьировались, за исключением начальных приближений, которые получались для каждого графика из аппроксимации данных соответствующей однотоновой спектроскопии алгоритмом, описанным выше. Как видно, удалось добиться устойчивой работы алгоритма на достаточно широком диапазоне модельных кривых, что дает возможность применять разработанный код в реальных автономно работающих экспериментах.

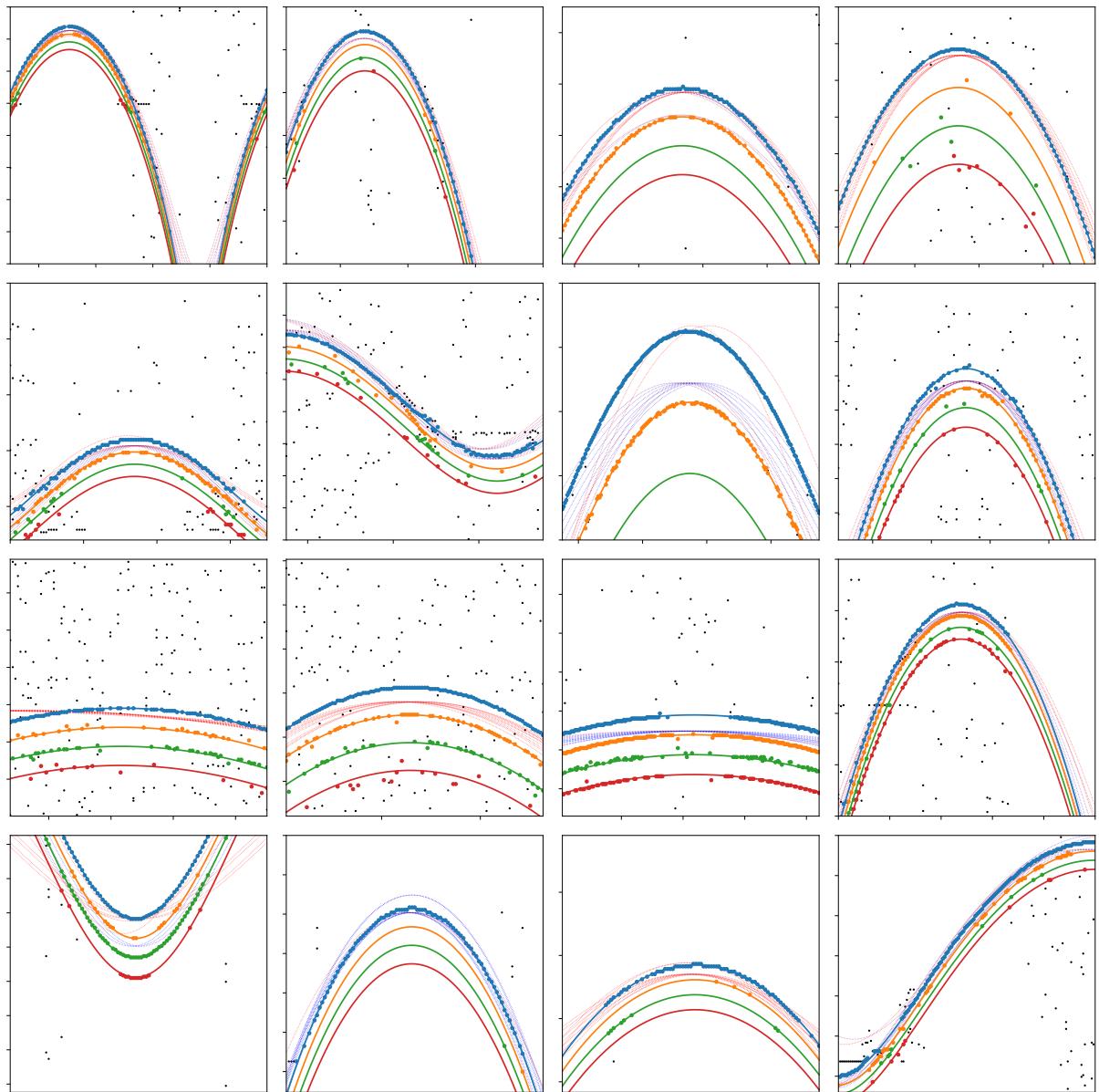


Рис. 7: Результаты работы алгоритма на некоторых экспериментальных спектрах. Метапараметры фиксированы, выполнение проводилось в простом цикле по данным и начальным приближениям, полученным при распознавании соответствующих результатов ОТС. Черными точками показаны выбросы, присутствовавшие после предварительной обработки; цветами обозначены аппроксимированные модельные линии и их инлаеры. Тонким пунктиром показаны десять лучших кандидатов, найденных в первом шаге грубой оптимизации.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию системы из двух связанных трансмонов, образующих сверхпроводниковую искусственную молекулу (СИМ), и гибридизацию её состояний с излучением. В литературе в области представлено достаточно большое количество результатов, касающихся исследования двухкубитных систем, однако автору удалось обнаружить и описать качественно новые спектроскопические проявления эффекта Отлера-Таунса (ЭОТ) в случае, если компоненты молекулы облучаются несимметрично. Подобные эффекты до сих пор не описывались, так как прошлые работы по ЭОТ изучали либо единичные атомы, либо описывали только стандартные спектральные черты эффекта, хорошо известные из квантовой оптики XX века. Если расширить круг поиска и рассмотреть в целом эксперименты по спектроскопии связанных трансмонов, то обнаруживается, что и здесь ничего подобного не наблюдали, так как либо использовались сигналы малой мощности, что позволяло различить только основные однофотонные линии , либо для возбуждения переходов на верхние энергетические уровни подавался сигнал с двумя различными частотными компонентами, либо разрешение данных было недостаточным , либо использовались неперестраиваемые по частоте трансмоны. Эксперименты с натуральными молекулами также не фиксировали подобного поведения, что неудивительно, так как трудно исследовать изолированную молекулу, не говоря уже о том, чтобы индивидуально контролировать частоты переходов атомов, из которых она состоит, что физически невозможно.

Оптическая фотография экспериментального образца, разработанного под руководством автора вместе со студентами магистратуры и изготовленного на мощностях чистой зоны НОЦ ФМН МГТУ и ВНИИА Духова, изображен на Рис. 8 (а). Гамильтониан связи между трансмонами СИМ состоит из двух компонент: прямое электрическое взаимодействие и опосредованное дисперсионное через квантовую шину, которая служит также и для совмещенного дисперсионного считывания, как показано на Рис. 8 (б). Излучение подается через antennу (отдельный копланарный волновод) сразу на обе подсистемы. В эксперименте мы проводим спектроскопию с высоким разрешением в области, показанной пунктиром на Рис. 8 (в).

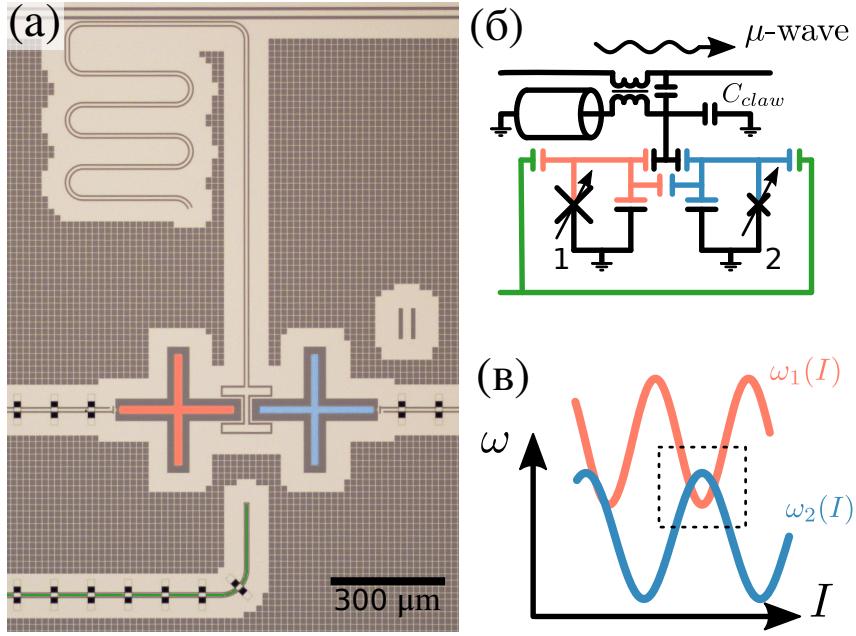


Рис. 8: (а) Оптический микрограф устройства (в ложном цвете). Два трансмона (оранжевый, 1 и синий, 2) связаны с копланарным резонатором. Линии управления частотой подходят с боков, снизу подведена микроволновая антенна (зеленый). (б) Эквивалентная электрическая схема. Как перестраиваемые джозефсоновские переходы изображены СКВИДы трансмонов, управляемые магнитным полем. (с) Схематический рисунок частот кубитных переходов трансмонов $\omega_1(I)$ и $\omega_2(I)$ в зависимости от тока внешнего соленоида при правильном выравнивании локальными потоковыми линиями. Пунктиром обведена рабочая область эксперимента.

Результаты спектроскопии представлены на Рис. 9 (а). Главные особенности спектра, обозначенные римскими цифрами I, II, III, обнаружены и описаны автором впервые и являются следствием сложной модификации эффекта Аутлера-Таунса, когда монохроматическое излучение оказывается одновременно как зондирующим, так и одевающим сигналом. Помимо этих особенностей, в диссертации подробно описаны и вторичные, менее заметные черты, обозначенные на графике арабскими цифрами. Автором проводилось также численное моделирование на основе решения основного уравнения для эволюции подсистемы для установившейся матрицы плотности, которая затем подставлялась в выражение для вычисления среднего оператора совмещенного считывания. Было получено в целом хорошее совпадение данных с экспериментом, за исключением проблем с воспроизведением высот и ширин некоторых многофотонных пиков и общего увеличения всех сигналов примерно на 30% по сравнению с предсказанным [Рис. 9 (б, в)]. На Рис. 9 (г) показана населенность состояния $|10\rangle$, в котором однократно возбужден первый

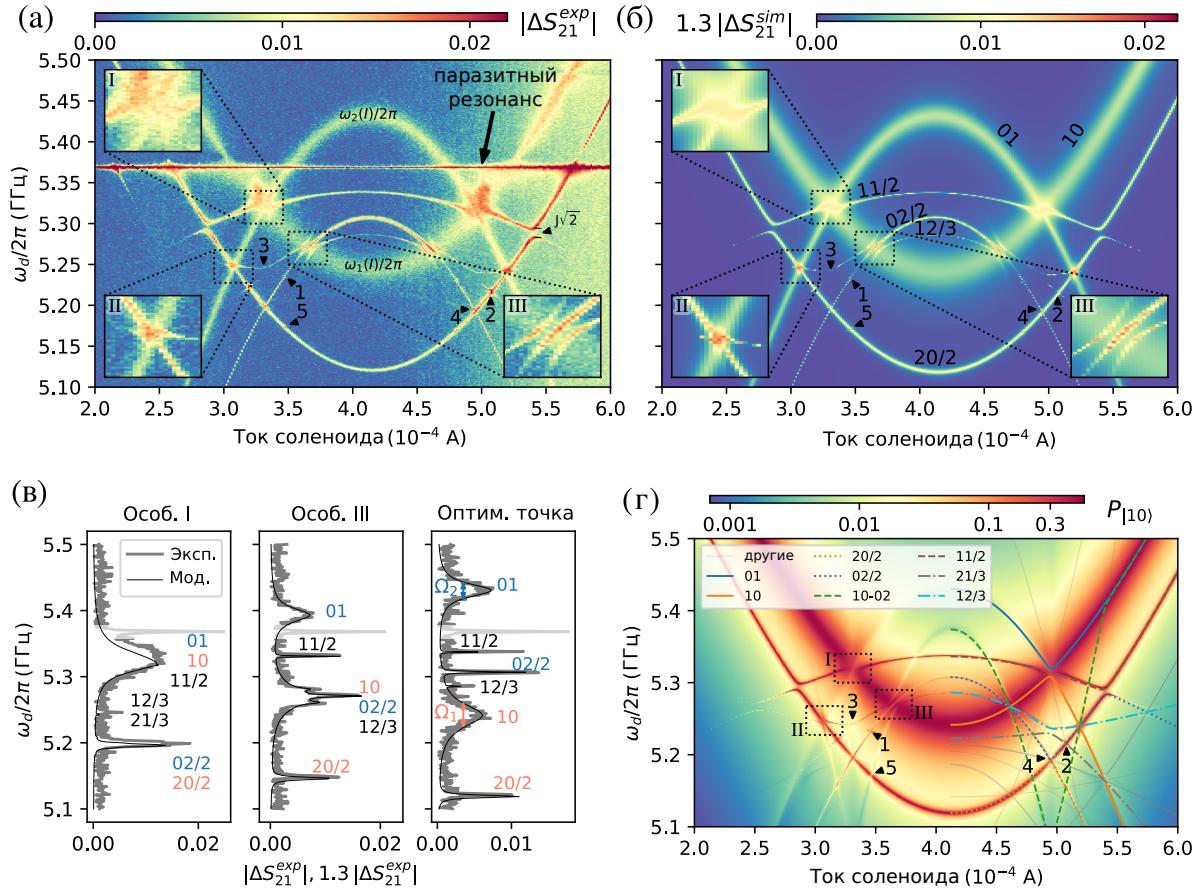


Рис. 9: (а) Данные ДТС. Цветом показан модуль отклонения $|\Delta S_{21}^{exp}|(I, \omega_d)$ комплексного коэффициента пропускания от значения в левом нижнем углу графика. Трансмюны выровнены как на Рис. 8 (в) и их спектральные линии формируют симметричную картину. Три эффекта, не предсказываемые невозмущенной моделью, показаны во вставках I, II и III; остальные особенности, воспроизводящиеся полной численной моделью, пронумерованы арабскими цифрами. (б) Результаты численного расчета. Рассчитанное значение $|\Delta S_{21}^{sim}|(I, \omega_d)$ искусственно увеличено в 1.3 раза для достижения количественного совпадения с экспериментом. (в) Срезы (а) and (б) при нескольких значениях тока соленоида: 0.333 мА (особенность I), 0.365 мА (особенность III), 0.411 мА (оптимальная точка); экспериментальные данные показаны серым, счет черным цветом. (г) Рассчитанная заселенность уровня $|10\rangle$ в зависимости от I and ω_d . Кривыми показаны частоты разнообразных переходов, вычисленные из невозмущенного гамильтониана. На легенде подписаны основные переходы в таком порядке, как они расположены в окрестности оптимальной точки. Под отметкой “другие” мы помещаем все остальные переходы системы, попадающие в диапазон частот графика.

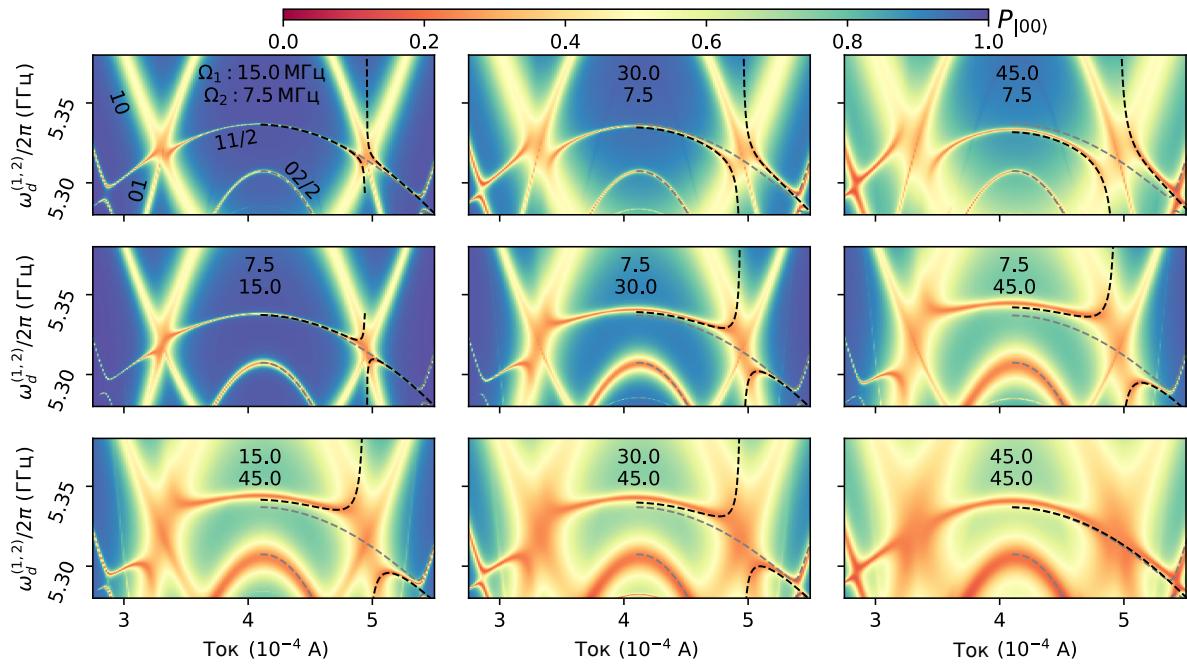


Рис. 10: Численное моделирование зависимости особенности I от мощности. Цветом показана заселенность основного состояния в установившемся состоянии, когда трансмопы облучаются на одной частоте, но с разными интенсивностями $\Omega_{1,2}$. В верхнем (среднем) ряду, $\Omega_{1(2)}$ увеличивается, в то время как $\Omega_{2(1)} = \text{const}$, $\Omega_{2(1)} < \Omega_{1(2)}$; две топологически отличные схемы расщепления возникают в зависимости от того, на каком из трансмопов интенсивность излучения больше. В нижнем ряду показано, как расщепления исчезают, если более слабое возмущение доводится по уровню до более сильного. Серые штриховые линии показывают невозмущенное решение, а черным показаны модельные кривые.

трансмоп. Видно, что особенность III образуется пересечением переходов 10, 02/2 (двухфотонным), 12/3 и 10-02, то есть выполнением сложного резонансного условия между однофотонными и многофотонными переходами.

Автором были построены самосогласованные аналитические модели, описывающие форму наблюдаемых квазипересечений с учетом их зависимости от интенсивности излучения. Например, для особенности III полученная аналитическая формула выглядит следующим образом:

$$\omega_d^{(III,\pm)} = \frac{2\alpha_2}{3} + \frac{4\omega_2}{3} - \frac{\omega_1}{3} \pm \frac{\sqrt{3\Omega_1^2 + (\alpha_2 + 2(\omega_2 - \omega_1))^2}}{3}. \quad (3)$$

Удалось описать также и поведение системы в области I, где однофотонные переходы одеваются кубитные переходы обоих трансмопов одновременно. Экспериментально эффект слабо различим из-за фиксиро-

ванного и близкого к единице отношения частот Раби, $\Omega_1/\Omega_2 \approx 2$ (эффект пропадает в случае $\Omega_1 = \Omega_2$), однако в численном моделировании для произвольных $\Omega_{1,2}$ можно получить ярко выраженные квазипересечения, показанные на Рис. 10. Для этого режима самосогласованным методом получено универсальное выражение, описывающее поведение частоты двухфотонного перехода $11/2$, зондирующего получающуюся систему уровней:

$$\omega_d^I = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} + \frac{\Omega_1^2 - \Omega_2^2}{2(\omega_1 - \omega_2)} \quad (4)$$

Выражение расходится в области равенства частот кубитов, и поэтому может применяться в области $|\omega_1 - \omega_2| \geq J$.

Четвертая глава посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию прохождения излучения через цепочку из пяти трансмонов, подключенную к двум полубесконечным волноводам на своих краях. Предложенное автором устройство демонстрирует возможность проводить эксперименты с проектированием динамики Флоке, когда вместо дискретных квантовых операций на систему подается непрерывное излучение на наборе частот, что делает невозможным применение переход во врачающийся базис и решение задачи эволюции через матричную экспоненту. Нахождение волновой функции системы в таком режиме возможно только путем полного решения дифференциального уравнения Шредингера и представляет большую трудность по сравнению с классическим воспроизведением результатов обычного квантового алгоритма через последовательное умножение матриц большой размерности.

Экспериментальный образец представлен на Рис. 11 (а). Для проведения экспериментов автор использовали пять емкостно связанных и перестраиваемых по частоте иксмонов (образец был спроектирован под руководством автора вместе со студентами магистратуры и изготовлен в НОЦ ФМН МГТУ и ВНИИА Духова). Сильная связь с двумя открытыми одномерными пространствами обеспечивается при помощи крупных встречно-штыревых конденсаторов, размещенных на концах копланарных волноводов, и позволяет измерять электромагнитное пропускание через структуру. На Рис. 11 (б) приведена иллюстрация физической мо-

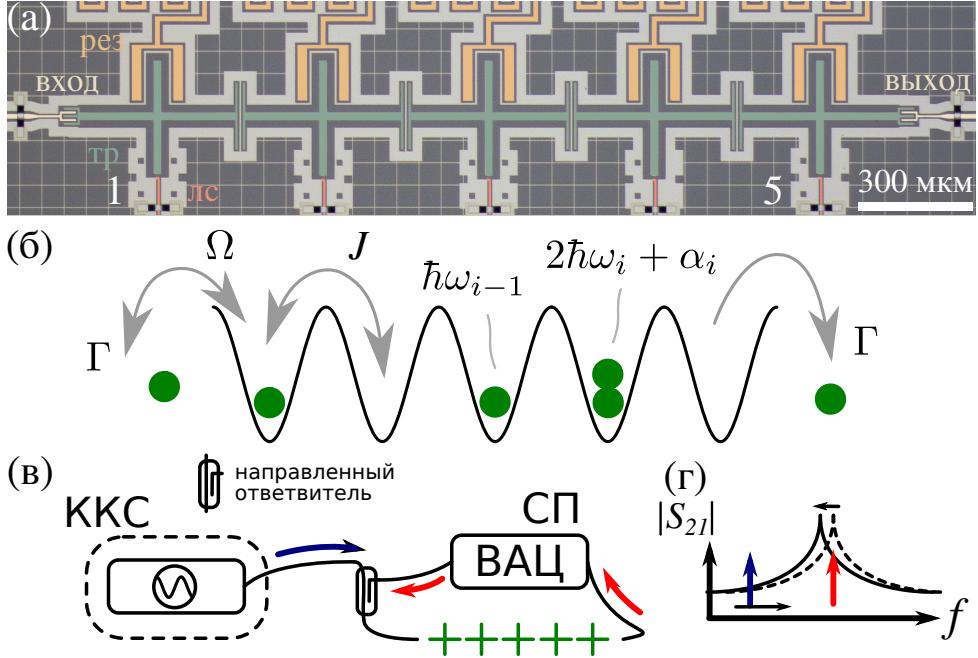


Рис. 11: (а) Оптическое изображение устройства (в ложном цвете). Входной и выходной волноводы (бежевый) сильно связаны с трансмонами (зеленый) на краях цепочки. Трансмоны могут считываться дисперсионно вспомогательными резонаторами (оранжевый) и перестраиваться по частоте линиями смещения (красный). (б) Модель, отображаемая на устройство – решетка Б-Х с пятью ячейками. Бозоны поступают справа из входящего возбуждения амплитуды Ω и утекают, главным образом, на края со скоростью Γ . Энергия i -го локализованного бозона равна $\hbar\omega_i$, добавление еще одного бозона в ту же ячейку требует энергии $\hbar\alpha_i < 0$. Бозоны также могут туннелировать между соседними ячейками со скоростью J . (в) Качественное изображение измерительной установки: спектроскопия пропускания (СП) делается при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ), измеряющего комплексное пропускание S_{21} . Кросс-керровская спектроскопия (ККС) требует добавления дополнительного микроволнового генератора, подключаемого через направленный ответвитель. (г) ККС производится путем развертывания частоты дополнительного генератора (синяя стрелка) и наблюдения изменений в пропускании в области одного из резонансов анализатором цепей (красная стрелка).

дели, которая отображается на устройство; соответствующий гамильтониан с учетом когерентной накачки может быть записан как

$$\begin{aligned} \hat{H}/\hbar = & \sum_{i=1}^5 \left[(\omega_i - \omega_d) \hat{b}_i^\dagger \hat{b}_i + \frac{1}{2} \alpha_i \hat{b}_i^\dagger \hat{b}_i (\hat{b}_i^\dagger \hat{b}_i - 1) \right] \\ & + J \sum_{i=1}^4 \left[\hat{b}_{i+1}^\dagger \hat{b}_i + \hat{b}_{i+1} \hat{b}_i^\dagger \right] + \frac{\Omega}{2} (\hat{b}_1^\dagger + \hat{b}_1), \end{aligned} \quad (5)$$

где \hat{b}_i , $\hbar\omega_i$ и $\hbar\alpha_i$ – это, соответственно, оператор уничтожения, энергия одиночного локализованного бозона и энергия взаимодействия бозонов для i -ой ячейки; туннелирование между ячейками происходит со ско-

ростью J , а циклическая частота накачки равна ω_d . Диссипативные процессы учитывались при помощи уравнения Лиувилля с линдбладовскими сверхоператорами на основе операторов коллапса, описывающих релаксацию и чистую дефазировку на каждой ячейке со скоростями γ_i и $\gamma_{\phi}^{(i)}$. Сильная связи с линией подразумевает, что $\gamma_1 \approx \gamma_5 = \Gamma$ являются основным источником декогеренции. Если $\omega_i = \omega$, $\alpha_i = \alpha$, то восстанавливается стандартный вид гамильтониана модели Б-Х.

На Рис. 11 (в) схематически изображена экспериментальная установка для измерения свойств образца. Мы измеряем комплексный коэффициент матрицы рассеяния для пропускания через двухпортовое устройство S_{21} при помощи векторного анализатора цепей (спектроскопия пропускания, СП) и, дополнительно используя микроволновый генератор, осуществляя кросс-керровскую спектроскопию (ККС) системы; в обоих случаях используются непрерывные микроволновые сигналы и исследуется установившееся поведение системы. Для получения теоретического предсказания параметра S_{21} использовался формализм квантовой теории отклика.

Результаты спектроскопии пропускания показаны на Рис. 12 (а). Чтобы продемонстрировать структуру собственных состояний и точно извлечь ω_i и J , мы смещаем один из трансмонов по частоте вокруг точки вырождения, в то время как остальные зафиксированы на 4.05 ГГц. В левой колонке Рис. 12 смещается потоком первый трансмон, а в правой – средний. Как можно видеть, первый взаимодействует со всеми коллективными состояниями, а третий только с нечетными; по модельным кривым можно понять, что такое поведение полностью предсказывается гамильтонианом (5) без накачки. С помощью численной аппроксимации мы определяем, что скорость туннелирования $J/2\pi \approx 41$ МГц.

При увеличении мощности падающего сигнала, на пропускании наблюдается эффект фотонной блокады, заключающийся в спадании пропускания пропорционально приложенной мощности. Подобные эффекты часто наблюдаются при исследовании одиночных сверхпроводниковых кубитов, связанных с микроволновой линией. В нижнем ряду Рис. 12 (а) мы наблюдаем также и признаки возбуждения многочастичных состояний системы, которые уже не имеют классических аналогий. Изменения

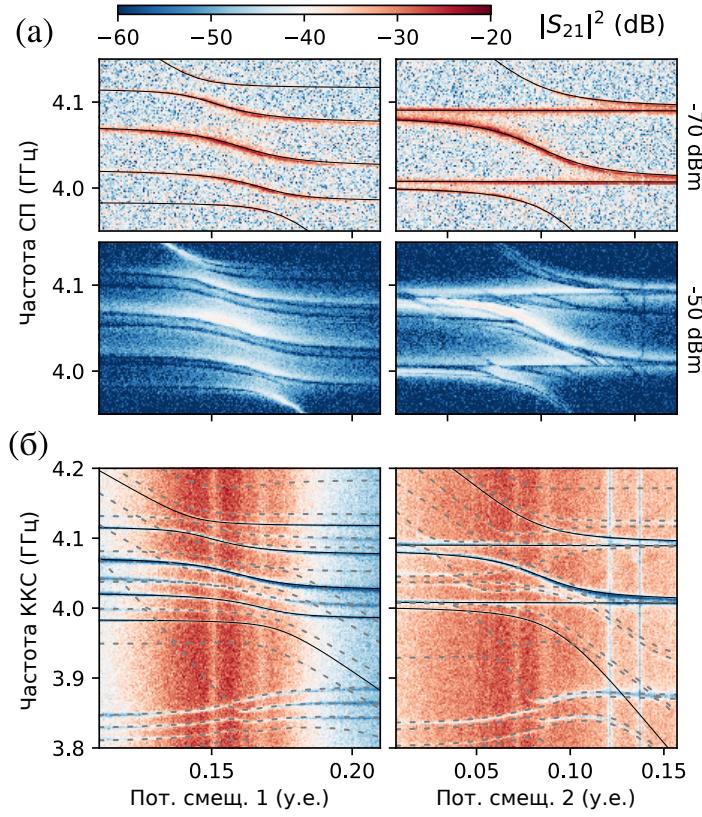


Рис. 12: (а) Данные ПС цепочки в зависимости от потокового смещения одного из трансмонов. S_{21} включает аттенюацию и усиление в измерительном тракте, мощность ВАЦ показана справа. В верхнем ряду черные сплошные линии показывают предсказание Ур. (5) для частот нижних пяти переходов при $J/2\pi = 41$ МГц, $\omega_i/2\pi \approx 4.05$ ГГц, $\Omega = 0$. (б) ККС на третьей по порядку моде, показывающая зарождающуюся зонную структуру системы. Прерывистыми линиями показаны предсказания модели для частот чисто квантовых переходов.

в поведении системы при увеличении мощности мы поэтому называем переходом от классического к квантовому режиму. Остающиеся параметры α_i Ур. (5) можно определить путем аппроксимации данных ККС, результаты которой показаны на Рис. 12 (б) для тех же конфигураций частот трансмонов, что и на фрагменте (а).

Для более подробного изучения энергетической структуры и неравновесной динамики системы при переходе к неклассическому режиму, проводился еще один эксперимент по спектроскопии пропускания с фиксированной вырожденной конфигурацией трансмонов на частоте $\omega/2\pi = 3.9$ ГГц. В линейном режиме мы оцениваем потери из-за связи с микроволновыми линиями на крайних трансонах и собственную диссипацию на внутренних путем численной аппроксимации комплексного пропускания в зависимости от частоты линейной моделью, полученной из урав-

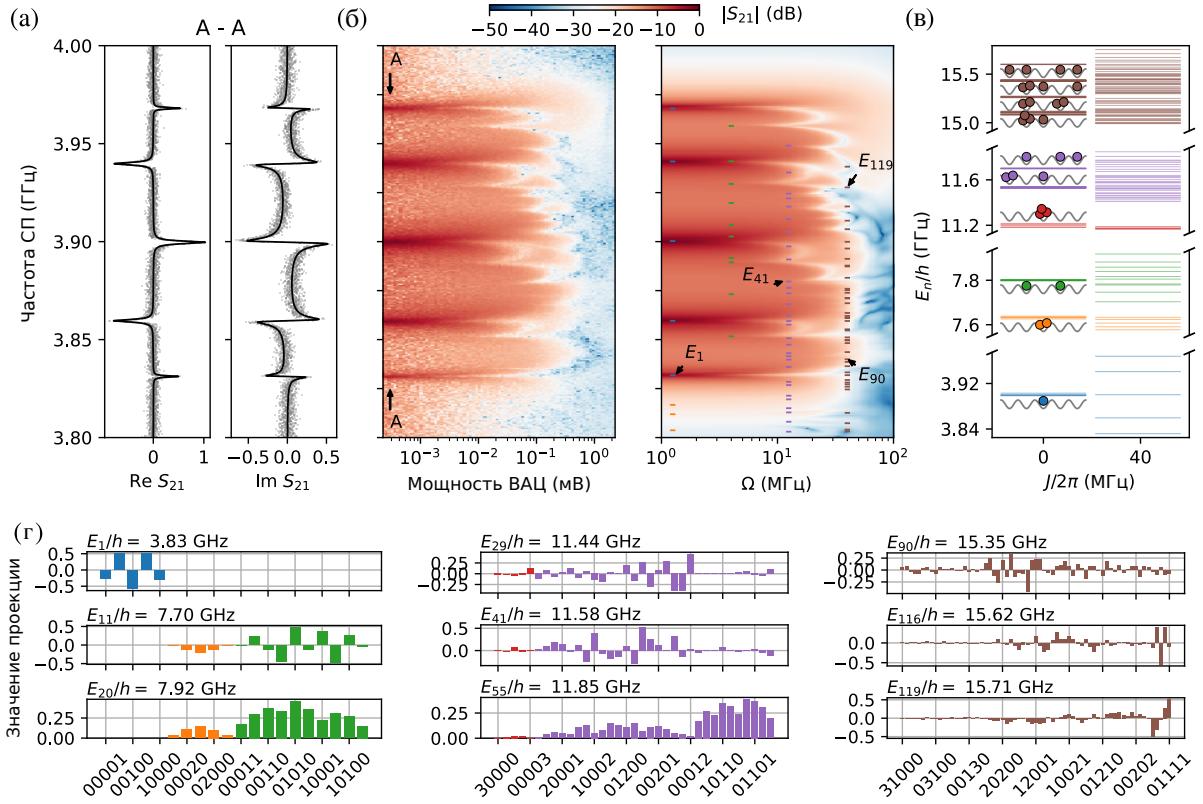


Рис. 13: (а) Аналитическое решение для S_{21} в линейном режиме (черные сплошные кривые) аппроксимированные к данным для малой мощности (точки), с нормировкой. (б) Экспериментальные и численные данные для $|S_{21}|$ для различных мощностей накачки. Мощность накачки откалибрована для совпадения с параметром Ω численного расчета. Штрихами показаны частоты многофотонных переходов, полученных из численно рассчитанных собственных уровней энергии, изображенных на (в). (в) Энергетическая структура системы со взаимодействием и без него при значениях параметров, полученных из численной аппроксимации; учитывается максимум три возбуждения на ячейку и четыре на всю цепочку; E_n – энергия n -го состояния, $E_0 = 0$. (г) Некоторые относящиеся к экспериментально наблюдаемым переходам состояния модели, согласно численному расчету, в проекции на невозмущенный базис (цвета из фрагмента (в)). “Врожденная” случайность в коэффициентах разложения высокозергетических состояний обуславливает произвольность в распределении уровней энергии.

нений Ланжевена и изображенной на Рис. 13 (а). При увеличении мощности сигнала пики нормальных колебаний постепенно насыщаются и уширяются за счет фотонной блокады; одновременно с этим возникают новые линии с существенно подавленным пропусканием и связанные с отражением от цепочки в результате многофотонных переходов в многочастичные состояния. Экспериментальные данные хорошо соглашаются с численным расчетом для установившегося режима для модели Бозе-Хаббарда с пятью трехуровневыми ячейками, результаты которого показаны на Рис. 13 (б). На Рис. 13 (в) показаны проекции неко-

рых из них на базис факторизованных состояний при $J = 0$. Состояние $|1\rangle$ идентично по структуре классической симметричной низкочастотной нормальной моде колебаний. Состояния $|11\rangle$ и $|20\rangle$ находятся на краях зеленой подзоны двухфотонного подпространства и являются суперпозициями гораздо большего размера. Уже для этих состояний можно заметить раскрывающуюся случайность в коэффициентах разложения, которая становится все более и более выраженной с ростом энергии также, как и в случае с энергетическими уровнями. Никакой симметрии или хотя бы какой-то структуры не наблюдается для высших энергетических состояний, за исключением дырочного подпространства с четырьмя возбуждениями, двойственного однофотонному подпространству (см. правую часть графиков для $|116\rangle$, $|119\rangle$).

Наконец, изучалась многочастичная локализация в системе, вызванная беспорядком. Чтобы выяснить, как локализация меняет транспортные свойства системы, мы вносим контролируемый беспорядок в частоты трансмонов, распределяя их случайно вокруг точки вырождения в эксперименте, похожем на ранее проводившиеся другими группами численные опыты. Для всех трансмонов выбирается определенное среднеквадратичное отклонение σ , а затем каждому выставляется частота $\omega + \delta\omega$, где $\delta\omega \in \mathbb{N}(0, 2\pi\sigma)$ и $\omega/2\pi = 3.9$ ГГц. Затем записывается экспериментальное пропускание и процесс повторяется 100 раз (количество здесь было ограничено главным образом временем измерения и стабильностью системы). На Рис. 14 (а) мы показываем два примера сырых данных до усреднения. Для меньших σ собственные состояния мало чувствительны к беспорядку и сохраняют свою структуру, но при $\sigma \approx J/2\pi$ моды практически распадаются. Усредненные кривые показаны на Рис. 14 (б) для нескольких значений σ : при достижении разбросом энергий ячеек скорости туннелирования между ними, усредненное пропускание исчезает. Таким образом, локализация проявляется в прекращении нелокально-го транспорта – одиночные фотоны, в среднем, не могут протуннелировать до противоположного конца цепочки. Это поведение напоминает переход сверхпроводник-изолятор, для описания которого изначально и предлагалось использовать модель Бозе-Хаббарда. Так как пропускание пропадает только в среднем, а в каждом отдельном случае в силу слу-

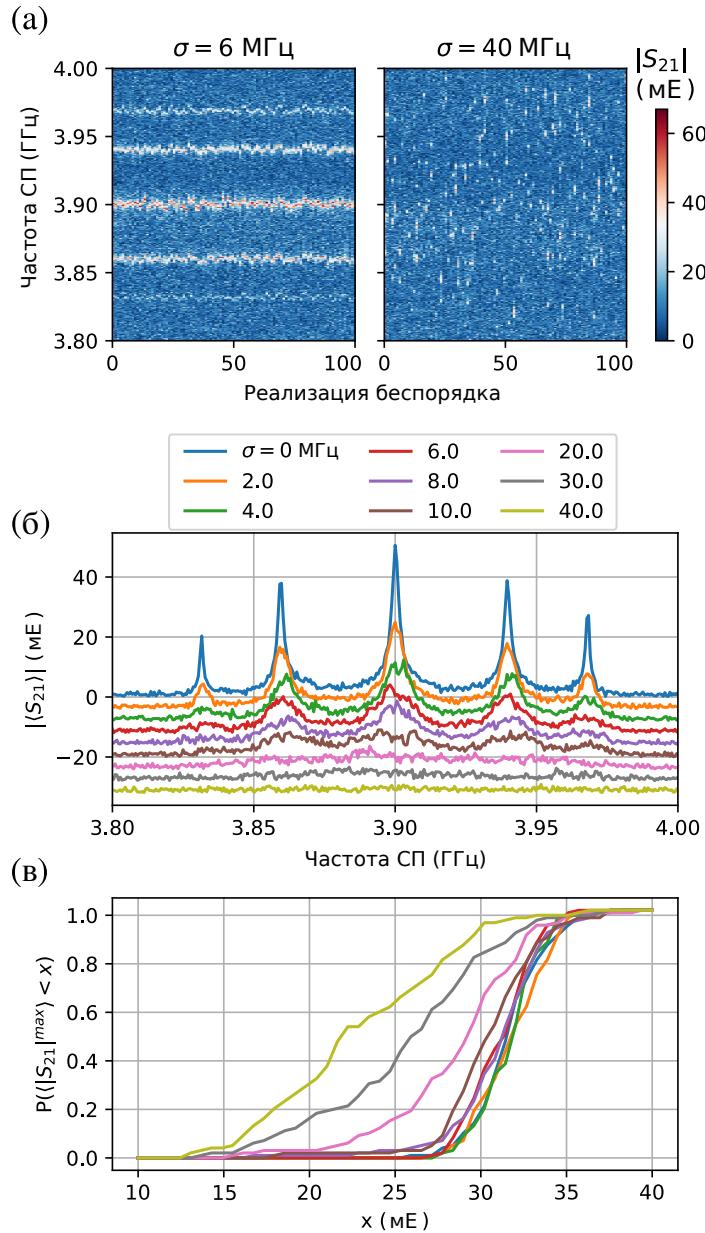


Рис. 14: (а) Сырые данные пропускания для $\sigma = 6, 40 \text{ МГц}$ и 100 реализаций беспорядка; модуль S_{12} показан цветом. (б) Локализация и прекращение транспорта с увеличением беспорядка. Каждая кривая показывает абсолютную величину усредненного по заданному экспериментально нормальному распределению пропускания с выбранным σ , показанным в легенде. Каждая следующая кривая смешена вниз на 4 мЕ для наглядности. (в) Функции распределения для величины самого яркого из пиков $\langle |S_{21}^{\max}| \rangle$ для каждой реализации, построенные для значений σ из (б).

чайности пики пропускания могут появляться даже при самом большом значении σ , мы строим также величину видности пиков, которую мы (достаточно произвольно) определяем как среднее по 10 точкам вокруг самого высокого значения пропускания. Однако, как видно на Рис. 14 (в) распределение этой величины испытывает качественное изменение при приближении σ к $J/2\pi$.

В заключении подводятся итоги выполненных в диссертационной работе исследований и полученных результатов.

Основные результаты диссертационной работы

Разработан программный код для автоматизации экспериментов со сверхпроводниковыми кубитами, в частности, создана система для автоматической калибровки физических параметров образцов на основе алгоритмов компьютерного зрения. Впервые предложен алгоритм на основе метода максимального правдоподобия для оценки параметров кубита-трансмона, связанного с резонатором, в архитектуре квантовой электродинамики цепей из данных однотоновой спектроскопии (ОТС) векторным анализатором цепей [A1]. Показано, что предложенный метод позволяет аппроксимировать любую из трех возможных зависимостей резонансной частоты от магнитного потока и устойчив к шуму, в то же время обладая достаточно высокой производительностью и точностью для применения на практике. Алгоритм может использоваться и в других целях: например, для установления матрицы индуктивности и определения перекрестных взаимодействий основываясь исключительно на данных ОТС. Также предложен оптимизационный метод автоматической многомодельной обработки данных двухтоновой спектроскопии (ДТС) с чертами преобразования Хафа и алгоритма RANSAC, способный устойчиво работать в условиях количественного преобладания шумовых точек и наличия паразитных спектральных линий, отличающихся по форме от искомых. Разработанные библиотеки использовались в работах [33, A2, A3, A5].

Обнаружены экспериментально и исследованы теоретически эффек-

ты гибридизации излучения с двухатомной искусственной молекулой на основе связанных трансмонов [33]. Система подвергалась интенсивному воздействию СВЧ-сигнала, так что возможно было наблюдать значительное количество многофотонных переходов, отражающих структуру уровней композитной системы за пределами двухкубитного базиса. Благодаря высокой когерентности системы среди таких переходов удалось обнаружить отличия от предсказаний стационарного уравнения Шредингера без учета излучения, заключавшихся в образовании новых квазипересечений, размер которых оказался зависящим от мощности сигнала, т.е. от Раби-частоты. Эффект был идентифицирован как ранее не наблюдавшаяся разновидность эффекта Отлера-Таунса (ЭОТ), в котором разделение сигналов происходит не за счет разности их частот, но за счет того, на какое гильбертово подпространство действуют соответствующие им операторы возмущения и какого порядка процессы ими вызываются. Так как в такой конфигурации используется монохроматический, для наблюдения эффекта требуется выполнение сложного резонансного условия в структуре уровней и одновременного совмещения не-резонансного расщепления одетых состояний одного кубита с многофотонным переходом по состояниям другого. Автором были предложены самосогласованные модели, точно предсказывающие положение триплетов для всех наблюдавшихся квазипересечений.

Наконец, впервые исследована цепочка из пяти трансмонов в режиме моделирования диссипативной системы Бозе-Хаббарда с накачкой [A5]. Для этого к ее противоположным концам подключались два СВЧ-волновода, в один из которых подавался сигнал переменной мощности с одного входа векторного анализатора, а другой был подключен через малошумящий усилитель к другому его входу. Было экспериментально показано, что в линейном режиме при малой мощности накачки система ведет себя в полном согласии с классической теорией нормальных колебаний для пяти связанных осцилляторов в духе принципе соответствия: волновые функции такой системы оказываются дуальны векторам нормальных мод и такими же свойствами обладает и спектр пропускания. Однако при повышении мощности сигнала наблюдается эффект фотонной блокады и обнаруживаются переходы на уже строго квантовомеха-

нические многочастичные состояния, не имеющие классического аналога. Далее, система подвергалась введению в частоты кубитов беспорядка, имитирующего наличие потенциальных барьеров между ячейками. Было обнаружено соответствие поведения пропускания через систему с ранее исследованными эффектами многочастичной локализации: в среднем пропускание прекращается, когда разброс частот оказывается порядка скорости туннелирования одиночных возбуждений между трансмонами. Таким образом было подтверждено, что композитная квантовая система, работающая в режиме сильной связи с континуумом мод, может сохранять свои квантовые свойства, что явственно проявляется в излучаемом ею свете. Этот эксперимент открывает новые пути для исследований в области разработки алгоритмов на основе теории Флоке для накачиваемых непрерывными сигналами систем, а также может оказаться полезным в области исследования оптимизированных методов расчета в сокращенных гильбертовых пространствах с помощью тензорных сетей.

Основные публикации по теме диссертации

- [A1] Fedorov G. P., Ustinov A. V. Automated analysis of single-tone spectroscopic data for cQED systems // Quantum Science and Technology. — 2019. — Vol. 4, no. 4. — P. 045009.
- [A2] Superconducting qubits in Russia / I. Besedin, G. Fedorov, A. Dmitriev, V. Ryazanov // Quantum Electron. — 2018. — Vol. 48, no. 10. — P. 880–885.
- [A3] Improving the quality factor of superconducting resonators by post-process surface treatment / D. Kalacheva, G. Fedorov, A. Kulakova et al. // AIP Conf. Proc. — 2020. — Vol. 2241.
- [A4] Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / G. P. Fedorov, V. B. Yursa, A. E. Efimov et al. // Phys. Rev. A. — 2020. — Vol. 102, no. 1. — P. 013707.
- [A5] Photon transport in a Bose-Hubbard chain of superconducting arti-

ficial atoms / G. P. Fedorov, S. V. Remizov, D. S. Shapiro et al. // Phys. Rev. Letters. — 2021.

Список литературы

- [1] Nakamura Y., Chen C. D., Tsai J. S. Spectroscopy of energy-level splitting between two macroscopic quantum states of charge coherently superposed by Josephson coupling // Phys. Rev. Letters. — 1997. — Vol. 79, no. 12. — P. 2328.
- [2] Nakamura Y., Pashkin Y. A., Tsai J. S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box // nature. — 1999. — Vol. 398, no. 6730. — P. 786–788.
- [3] Superconducting qubits: Current state of play / M. Kjaergaard, M. E. Schwartz, J. Braumüller et al. // Annual Review of Condens. Matter Phys. — 2020. — Vol. 11. — P. 369–395.
- [4] Quantum supremacy using a programmable superconducting processor / F. Arute, K. Arya, R. Babbush et al. // Nature. — 2019. — Vol. 574, no. 7779. — P. 505–510.
- [5] Shor P. W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory // Phys. Rev. A. — 1995. — Vol. 52, no. 4. — P. R2493.
- [6] Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems / S. Krinner, S. Storz, P. Kurpiers et al. // EPJ Quantum Technology. — 2019. — Vol. 6, no. 1. — P. 2.
- [7] Physical qubit calibration on a directed acyclic graph / J. Kelly, P. O’Malley, M. Neeley et al. // arXiv:1803.03226. — 2018.
- [8] Tunable superconducting qubits with flux-independent coherence / M. D. Hutchings, J. B. Hertzberg, Y. Liu et al. // Phys. Rev. Applied. — 2017. — Vol. 8, no. 4. — P. 044003.

- [9] Blais A., Girvin S. M., Oliver W. D. Quantum Inf. Process. and Quantum Opt. with circuit quantum electrodynamics // Nat. Phys. — 2020. — P. 1–10.
- [10] Haroche S. Nobel Lecture: Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary // Rev. Mod. Phys. — 2013. — Vol. 85, no. 3. — P. 1083.
- [11] Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics / A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais et al. // Nature. — 2004. — Vol. 431, no. 7005. — P. 162–167.
- [12] Deterministically encoding quantum information using 100-photon Schrödinger cat states / B. Vlastakis, G. Kirchmair, Z. Leghtas et al. // Science. — 2013. — Vol. 342, no. 6158. — P. 607–610.
- [13] Dynamically protected cat-qubits: a new paradigm for universal quantum computation / M. Mirrahimi, Z. Leghtas, V. V. Albert et al. // New J. Phys. — 2014. — Vol. 16, no. 4. — P. 045014.
- [14] Demonstration of quantum volume 64 on a superconducting quantum computing system / P. Jurcevic, A. Javadi-Abhari, L. S. Bishop et al. // arXiv:2008.08571. — 2020.
- [15] Demonstration of universal parametric entangling gates on a multi-qubit lattice / M. Reagor, C. B. Osborn, N. Tezak et al. // Sci. Adv. — 2018. — Vol. 4, no. 2. — P. eaao3603.
- [16] Emulating weak localization using a solid-state quantum circuit / Y. Chen, P. Roushan, D. Sank et al. // Nat. Commun. — 2014. — Vol. 5, no. 1. — P. 1–6.
- [17] Spectroscopic signatures of localization with interacting photons in superconducting qubits / P. Roushan, C. Neill, J. Tangpanitanon et al. // Science. — 2017. — Vol. 358, no. 6367. — P. 1175–1179.
- [18] Quantum dynamics of simultaneously measured non-commuting observables / S. Hacohen-Gourgy, L. S. Martin, E. Flurin et al. // Nature. — 2016. — Vol. 538, no. 7626. — P. 491–494.

- [19] Resonance fluorescence of a single artificial atom / O. Astafiev, A. M. Zagoskin, A. A. Abdumalikov et al. // *Science*. — 2010. — Vol. 327, no. 5967. — P. 840–843.
- [20] Experimentally simulating the dynamics of quantum light and matter at deep-strong coupling / N. K. Langford, R. Sagastizabal, M. Kounalakis et al. // *Nat. Commun.* — 2017. — Vol. 8, no. 1. — P. 1–10.
- [21] Realizing a Deterministic Source of Multipartite-Entangled Photonic Qubits / J. Besse, K. Reuer, M. C. Collodo et al. // arXiv:2005.07060. — 2020.
- [22] Deterministic quantum state transfer and remote entanglement using microwave photons / P. Kurpiers, P. Magnard, T. Walter et al. // *Nature*. — 2018. — Vol. 558, no. 7709. — P. 264–267.
- [23] Feynman R. P. Simulating physics with computers // *Int. J. Theor. Phys.* — 1982. — Vol. 21, no. 6/7.
- [24] Phase Transitions in a programmable quantum spin glass simulator / R. Harris, Y. Sato, A. J. Berkley et al. // *Science*. — 2018. — Vol. 361, no. 6398. — P. 162–165.
- [25] Probing the many-body localization phase transition with superconducting circuits / T. Orell, A. A. Michailidis, M. Serbyn, M. Silveri // *Phys. Rev. B*. — 2019. — Vol. 100, no. 13. — P. 1–19. — 1907.04043.
- [26] A dissipatively stabilized Mott insulator of photons / R. Ma, B. Saxberg, C. Owens et al. // *Nature*. — 2019. — Vol. 566, no. 7742. — P. 51–57. — 1807.11342.
- [27] Cooling and Autonomous Feedback in a Bose-Hubbard Chain with Attractive Interactions / S. Hacohen-Gourgy, V. V. Ramasesh, C. De Grandi et al. // *Phys. Rev. Letters*. — 2015. — Vol. 115, no. 24. — P. 1–5. — 1506.05837.

- [28] Deng X. H., Lai C. Y., Chien C. C. Superconducting circuit simulator of Bose-Hubbard model with a flat band // Phys. Rev. B. — 2016. — Vol. 93, no. 5. — P. 1–12. — 1602.01559.
- [29] Propagation and Localization of Collective Excitations on a 24-Qubit Superconducting Processor / Y. Ye, Z. Y. Ge, Y. Wu et al. // Phys. Rev. Letters. — 2019. — Vol. 123, no. 5. — P. 1–6.
- [30] Strongly correlated quantum walks with a 12-qubit superconducting processor / Z. Yan, Y. R. Zhang, M. Gong et al. // Science. — 2019. — Vol. 756, no. May. — P. 753–756.
- [31] Implementation of a transmon qubit using superconducting granular aluminum / P. Winkel, K. Borisov, L. Grünhaupt et al. // Phys. Rev. X. — 2020. — Vol. 10, no. 3. — P. 031032.
- [32] URL: <https://github.com/vdrhtc/Measurement-automation>.
- [33] Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / G. P. Fedorov, V. B. Yursa, A. E. Efimov et al. // Phys. Rev. A. — 2020. — Vol. 102, no. 1. — P. 013707.