

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Москаленко Илья Николаевич

**Квантовая электродинамика сверхпроводниковых
структур на основе кубитов-флаксоиумов**

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Общая характеристика работы

Квантовые процессоры используют присущие квантово-механическим системам свойства, такие как квантовый параллелизм и квантовая интерференция, для решения определенных проблем, с которыми классические компьютеры не справляются. Помимо идеи Ричарда Фейнмана о возможности эффективного моделирования реальных квантовых систем посредством компьютера, работающего по принципам квантовой механики, сюда также входит ряд других задач, например: факторизация больших чисел при помощи алгоритма Шора и поиск в несортированной базе данных при помощи алгоритма Гровера.

Основная проблема при создании квантовых компьютеров заключается в необходимости, с одной стороны, обеспечить когерентный контроль над отдельными элементарными квантовыми подсистемами (кубитами) и управление их взаимодействиями, а также возможность измерения состояний кубитов, а с другой стороны сохранить сильную изоляцию системы от неконтролируемого окружения. Более того, уровень согласованности и адресуемости должен сохраняться при масштабировании системы до большого количества вычислительных элементов. Тем не менее, за последние два десятилетия быстрое развитие науки и техники квантовых систем позволило пройти путь от научных исследований отдельных изолированных квантовых систем до создания и манипуляции многокубитными процессорами.

В основе любой реализации кубитов, используемых в качестве элементарных ячеек квантовых процессоров, лежит использование управляемых квантовых степеней свободы. Большинство предложений заключается в использовании естественных физических систем с микроскопическими степенями свободы, например: ядерные спины [1] или спины электронов [2], различные переходы атомов [3] или ионов [4] в вакууме. Эти степени свободы могут быть хорошо изолированы от окружающей среды и обладать высокими временами когерентности. Основная проблема реализации таких систем заключается в увеличении связи между кубитами до уровня, необходимого для быстрых двухкубитных вентилях, без внесения дополнительных источников декогеренции.

Другим радикально отличающимся подходом к созданию кубитов является использование сверхпроводящих квантовых электрических цепей [5], в основе которого лежат коллективные электродинамические моды макроскопических электрических элементов. Замечательной особенностью сверхпроводниковых кубитов является их проектируемость [6]: энергетический спектр системы определяется параметрами элементов схемы, такими как емкость, индуктивность и джозефсоновский контакт, который играет роль бездиссипативного нелинейного элемента. Этот подход позволяет создавать “искусственные атомы” с заранее определенными свойствами в

широком диапазоне параметров с предсказуемыми частотами основных переходов и заданным ангармонизмом. Также сверхпроводниковые кубиты могут быть соединены друг с другом для обеспечения сильного взаимодействия [7] и напечатаны стандартными методами напыления тонких пленок и нано-литографии, упрощающих масштабирование системы.

Таким образом, являясь гибкой основой для создания искусственных систем, квантовые сверхпроводящие цепи на основе джозефсоновских контактов стали одной из самых успешных платформ для квантовых вычислений за последнее десятилетие. Одним из столпов такого успеха стала разработка кубита-трансмона[8], представляющего собой джозефсоновский переход шунтированный большой емкостью, собственные энергии которого подобны спектру слабо ангармонического осциллятора. Типичный набор компонентов для создания систем на основе трансмонов состоит из копланарного резонатора для дисперсионного считывания [6] и емкостной связи, которая обеспечивает реализацию двухкубитных вентилях [9]. Ключевым ограничением квантовых вычислений на основе трансмонов являются диэлектрические потери, уменьшающие время когерентности кубита. Постепенное развитие в материаловедении и технологии изготовления за последние 15 лет позволило увеличить времена когерентности таких кубитов с нескольких микросекунд [10] до 0.3 мс [11]. Однако, несмотря на этот значительный прогресс, диэлектрические потери по-прежнему остаются серьезной проблемой на пути к крупномасштабным квантовым вычислениям со сверхпроводящими кубитами. Еще одна фундаментальная проблема кубитов-трансмонов – это их низкий относительный ангармонизм, который приводит к увеличению длительности вентилях и, в конечном итоге, к снижению их точности. Тем не менее, кубиты-трансмоны оказались чрезвычайно успешными для разработки все еще сильно шумящих устройств обработки квантовой информации “среднего” масштаба (до 53-х и 56-ти кубитов)[12; 13]. Недавние эксперименты демонстрируют точность двухкубитных вентилях на трансмонах около 99,5% [14]. Стоит отметить также другие сложности масштабирования квантовых сверхпроводниковых устройств, связанные с необходимостью подавления неконтролируемого взаимодействия отдельных подсистем. Так в случае кубитов-трансмонов одним из наиболее существенных является статическое ZZ-взаимодействие. В последнее время в качестве эффективного инструмента для уменьшения таких перекрестных наводок [15] при создании многокубитных процессоров широко применяются перестраиваемые элементы связи.

Эти и другие сложности побуждают исследователей к поиску многокубитных архитектур с лучшей точностью вентилях и более простой системой управления для дальнейшего масштабирования квантовых вычислений.

Сверхпроводниковые кубиты-флаксоны [16] являются многообещающей альтернативой трансмонам из-за их низкой частоты основного перехода и лучших когерентных свойств. Флаксоном представляет собой джозефсоновский переход, шунтированный очень большой индуктивностью (“супериндуктивностью”), изготовленной из линейных массивов джозефсоновских контактов [16] или материалов с большой кинетической индуктивностью [17], превышающей эффективную индуктивность джозефсоновского контакта.

Времена жизни флаксонов достигают миллисекунд в их точках вырождения магнитного потока ($\pm\Phi_0/2$), что отчасти объясняется их низкой (сотни мегагерц) частотой основного перехода. К тому же, многообещающие времена когерентности ($> 200\text{мкс}$) уже были получены на таких кубитах в планарной геометрии [18], в то время как в трехмерных резонаторах времена когерентности превышают даже 1 мс [19]. Актуальные успехи масштабирования устройств на базе флаксонов заключаются в демонстрации микроволновых двухкубитных CZ вентилях [20] на кубитах, помещенных в объемный резонатор, а также демонстрации высокоточных вентилях [21] в более масштабируемом подходе, где два кубита-флаксона, связанные с индивидуальными считывающими резонаторами, интегрированы на одной микросхеме. В этом смысле, разработка архитектуры с перестраиваемой емкостной связью предоставит практический инструмент для создания устройств обработки квантовой информации «среднего» масштаба на основе кубитов-флаксонов.

Актуальность работы обусловлена интересом научного сообщества к развитию и практической реализации крупномасштабных квантовых вычислений на основе сверхпроводниковых квантовых электрических цепей, который, во-первых, побуждает к поиску многокубитных архитектур с лучшей точностью вентилях операций и более простой системой управления, а во-вторых, поиском альтернативных подходов к построению квантовых процессоров и симуляторов. Исследованные в работе системы на основе кубитов с высокой джозефсоновской индуктивностью могут стать основой для создания многокубитных систем с улучшенными когерентными свойствами и упрощенной системой контроля.

Целью данной работы является проектирование, экспериментальные и теоретические исследования сверхпроводниковых квантовых цепей на основе кубитов с высокой индуктивностью в виде линейных массивов джозефсоновских контактов, пригодных для построения масштабируемых квантовых процессоров или квантовых симуляторов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Развить методы расчета характеристик и проектирования систем сверхпроводниковых кубитов на основе джозефсоновской

- индуктивности, связанных с индивидуальным микроволновым резонатором в копланарной архитектуре.
2. Создать послойные структуры микросхем, содержащих сверхпроводниковые кубиты на основе джозефсоновской индуктивности, связанные с индивидуальными микроволновыми резонаторами в копланарной архитектуре.
 3. Разработать экспериментальную схему, позволяющую проводить измерения микроволнового отклика сверхпроводниковых кубитов с характерной частотой основного перехода ниже 1 ГГц.
 4. Рассчитать и исследовать двухкубитную схему с перестраиваемым элементом связи на основе кубитов с высокой джозефсоновской индуктивностью и частотой основного перехода ниже 1 ГГц.
 5. Предложить и реализовать процедуру инициализации кубитов с энергией основного перехода ниже энергии тепловых флуктуаций окружающей их среды.
 6. Реализовать двухкубитные вентили fSIM и CZ в двухкубитной схеме с перестраиваемым элементом связи на основе кубитов с высокой джозефсоновской индуктивностью.
 7. Реализовать и продемонстрировать работу алгоритма перекрестно-энтропийного тестирования для оценки точности выполнения двухкубитных вентилей fSIM и CZ.
 8. Провести численный и аналитический расчет квантовой динамики магнитного флаксона, захваченного в СКВИД.
 9. Предложить экспериментальный протокол, позволяющий проводить измерения динамики квантового флаксона, захваченного в СКВИД, с временным разрешением.

Научная новизна:

1. Впервые разработан и продемонстрирован сверхпроводниковый кубит на основе высокой индуктивности линейного массива джозефсоновских контактов с гальванически встроенной линией контроля магнитного потока в копланарной архитектуре.
2. Впервые разработан и продемонстрирован двухкубитный квантовый процессор с перестраиваемым элементом связи на кубитах с высокой джозефсоновской индуктивностью.
3. Впервые предложен метод детектирования положения одиночного квантового флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов на основе высокой джозефсоновской индуктивности, позволяющий проводить исследования квантовой динамики с временным разрешением.

Практическая значимость работы связана, во-первых, с возможностью применения разработанного метода проектирования сверхпроводниковых кубитов на основе высокой индуктивности линейного

массива джозефсоновских контактов, а также использования разработанных кубитов с гальванически встроенной линией контроля магнитного потока, для создания многокубитных квантовых систем на их основе. Во-вторых, с демонстрацией возможности построения универсального квантового процессора на основе кубитов с низкой частотой основного перехода, обладающих улучшенными когерентными свойствами и менее чувствительных к перекрестным наводкам, в сравнении с широко используемыми кубитами-трансмонами. Кроме того, низкая частота разработанных кубитов позволяет использовать субгигагерцовую электронику для обеспечения ресурсосберегающего управления кубитами, при котором возбуждение кубитов и контроль их частоты осуществляется по одной гальванически связанной линии управления при помощи одного канала генератора сигналов произвольной формы и без каких-либо квадратурных смесителей и высокочастотных генераторов сигнала несущей частоты, что требуется для работы кубитов-трансмонов.

Методология и методы исследования. Для получения результатов, заявленных в данной диссертации, применялись методы и техники эксперимента, широко используемые в международном научном сообществе, о чем свидетельствуют приведенные в работе ссылки на соответствующие источники. Автоматизация процедуры измерений выполнялась при помощи драйверов приборов и сценариев экспериментов (скриптов), разработанных на основе высокоуровневого языка программирования общего назначения Python. Обработка полученных экспериментальных данных, а также численные расчеты выполнялись с использованием библиотек: matplotlib, numpy, scipy, qutip и др, а также программного пакета Qutip.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложен метод проектирования сверхпроводниковых кубитов на основе высокой индуктивности линейного массива джозефсоновских контактов, связанных с индивидуальным микроволновым резонатором, в копланарной архитектуре.
2. Рассчитан и экспериментально продемонстрирован кубит-флакониум с гальванически встроенной линией контроля магнитного потока в копланарной архитектуре, который может быть использован как в качестве кубита, так и в качестве элемента связи при построении многокубитных систем на основе сверхпроводниковых кубитов.
3. Впервые разработан и экспериментально продемонстрирован двухкубитный квантовый процессор с перестраиваемым элементом связи на основе емкостно связанных кубитов-флакониумов с частотой основного перехода менее 1 ГГц. Реализованы двухкубитные вентили fSIM и CZ на одном устройстве.

4. Предложен метод детектирования положения одиночного флюксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов на основе высокой кинетической или джозефсоновской индуктивности, основанный на сдвиге частот плазменных мод джозефсоновских контактов. Данный подход впервые позволит проводить исследования квантовой динамики флюксона с временным разрешением.

Достоверность полученных результатов обеспечивается современными теоретическими и экспериментальными методами их получения, совпадением результатов проведенных расчетов и экспериментальных данных, а также положительно встреченной специалистами апробацией работы в виде публикаций результатов в реферируемых журналах по физике и докладов на международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. I. N. Moskalenko, I.S. Besedin and A. V. Ustinov, Multi-cell platform for fluxon-based quantum simulation // The 5th International Conference on Quantum Technologies ICQT-2019 (Москва, 2019).
2. I. N. Moskalenko, I.S. Besedin and A. V. Ustinov, Development and experimental study of fluxonium qubits in planar architecture // The 3rd International School on Quantum Technologies QTS'20 (Сочи, 2020).
3. I. N. Moskalenko, I.S. Besedin, N.N. Abramov, A. Grigoriev and A.V. Ustinov, Development of fluxonium qubits for quantum processors// The 6th International Conference on Quantum Technologies ICQT-2021 (Москва, 2021).
4. I. N. Moskalenko, Development of fluxonium qubits for quantum processors // II annual outdoor conference on quantum computing (Эстосадок, Россия, 19-26 февраля 2021) (устный доклад).
5. I. N. Moskalenko, Demonstration of the two-qubit gates on the fluxonium based superconducting quantum processor // III annual outdoor conference on quantum computing (Эстосадок, Россия, 18-25 февраля 2022) (устный доклад).

Личный вклад. Автор самостоятельно проводил квантовомеханические и электродинамические расчеты исследуемых систем для моделирования их свойств и проектирования микросхем, принимал активное участие в сборке и подготовке экспериментальной установки для исследования низкочастотных кубитов, программировал аппаратуру и составлял алгоритмы для автоматизации измерений, проводил измерения экспериментальных образцов и обработку полученных данных. Автор провел численный и аналитический расчет когерентной квантовой динамики магнитного флюксона, захваченного в двух- и трехъядерный СКВИД и предложил экспериментальный протокол для детектирования положения

такого флаксона, позволяющий проводить измерения его квантовой динамики с временным разрешением. Автор принимал активное участие в интерпретации полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации.

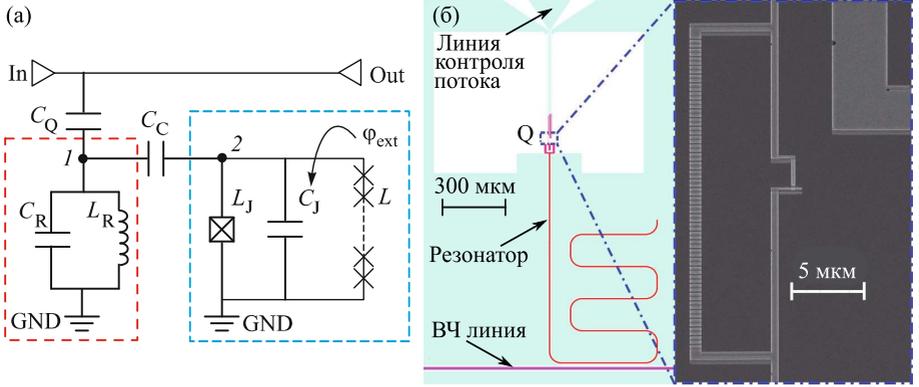
Основные результаты по теме диссертации изложены в 3 статьях в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus; 1 из которых опубликована в журнале, также рекомендованном ВАК.

Содержание работы

Во **введении** кратко представлены основные платформы, используемые для реализации квантовых процессоров и приведен обзор основных достижений в области построения квантовых процессоров на базе сверхпроводниковых кубитов. Здесь же дается обоснование актуальности проводимых исследований, формируется цель диссертационной работы и список задач, решаемых в ходе ее выполнения. Наконец, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит описание принципа использования квантовой электродинамики цепей для построения квантово-механических моделей на базе интегральных схем. Сформулированы основные требования предъявляемые к интегральным схемам и позволяющие наблюдать на них макроскопические квантовые эффекты. Этими требованиями являются низкие рабочие температуры, отсутствие диссипации и наличие нелинейного элемента, в роли которого чаще всего выступает туннельный джозефсоновский контакт сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник. Далее приведен краткий обзор большинства известных на сегодняшний день конструкций сверхпроводниковых кубитов, а также представлены их эквивалентные электрические схемы и характерный вид гамильтонианов.

Вторая глава посвящена разработке и экспериментальному исследованию кубитов-флаксоциумов, емкостно связанных с индивидуальными копланарными резонаторами. **Раздел 2.1** содержит вывод теоретической модели кубита-флаксоциума, связанного с копланарным микроволновым резонатором для дисперсионного считывания состояний кубита. Её эквивалентная электрическая схема представлена на рисунке 1. Цепь кубита включает в себя маленький джозефсоновский переход, выполняющий роль нелинейного элемента, джозефсоновская индуктивность и емкость которого обозначены как L_J и C_J , и “супериндуктивность”, обозначенную L , в качестве которой используется индуктивность линейного массива больших ($E_J \gg E_C$) джозефсоновских контактов Al-AlOx-Al. Маленький джозефсоновский переход ($E_J \sim E_C$) и “супериндуктивность” образуют замкнутый контур, магнитный поток в котором используется для контроля частоты



(а) – Эквивалентная электрическая цепь. (б) Топология экспериментального образца с увеличенным изображением контура флаксоинума и цепочки из 70 джозефсоновских контактов. Изображение получено при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).
Рис. 1 – Кубит-флаксоинум, емкостно связанный с копланарным микроволновым резонатором.

кубита. Гамильтониан системы принимает вид:

$$\hat{H}_{FR} = \hbar\omega_R \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_1 + \frac{E_C}{2} \hat{n}_2^2 + E_J (1 - \cos \hat{\varphi}_2) + \frac{E_L}{2} (\hat{\varphi}_2 - \varphi_{ex})^2 + \hbar g \hat{n}_2 (\hat{a}_1 + \hat{a}_1^\dagger), \quad (1)$$

где $E_C \approx \frac{(8e^2)}{(C_J + C_C)}$, $E_J = \frac{(\Phi_0/2\pi)^2}{L_J}$, $E_L = \frac{(\Phi_0/2\pi)^2}{L}$; $\hat{n}_2 = \frac{\hat{Q}_2}{2e}$, $\hat{\varphi}_2 = \frac{\hat{\Phi}_2}{\Phi_0}$ – операторы числа куперовских пар и разности фаз джозефсоновского перехода, а $\varphi_{ex} = \frac{\Phi_{ex}}{\Phi_0}$ – приведенный внешний поток в контуре кубита; \hat{a}_1^\dagger и \hat{a}_1 – операторы рождения и уничтожения фотона в резонаторе; $g \approx \frac{C_C \omega_R}{(C_J + C_C)} \sqrt{\frac{4}{\pi}} Z_R$ – константа связи кубита и резонатора, Z_R – импеданс передающей линии.

В **разделе 2.2** приведены особенности численного подхода к моделированию квантовых физических систем, а в **разделе 2.3** приведены расчетные методы, использованные для проектирования планарной структуры образцов кубитов-флаксоинумов. Часть топологии микросхемы, содержащей кубит-флаксоинум, резонатор, линию контроля потока и ВЧ линию подачи считывающего сигнала, приведена на рисунке 1б. Расчёт частот резонаторов и коэффициента связи между копланарными линиями проводился численным методом на основе гиперэллиптических интегралов, согласно работе [23], а расчет характерных значений ёмкостей электродов проводился при помощи бесплатной программы FastCap.

В **разделе 2.4** описана процедура изготовления экспериментального образца по разработанной автором топологии в НОЦ "Функциональные

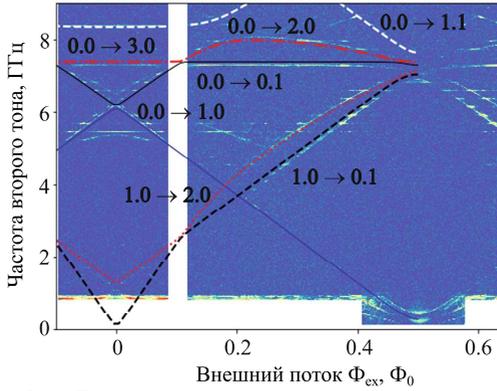


Рис. 2 — Результат двухтоновой спектроскопии.

микро/наносистемы" в МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием техники теневого напыления «Dolan Bridge».

Раздел 2.5 посвящен описанию экспериментальной установки. Все эксперименты проводились в криостате растворения Oxford Instruments Triton DR-200 с рабочей температурой 20–30 мК. Однотоновая и двухтоновая спектроскопии образца проводились при помощи векторного анализатора цепей Agilent PNA-X (ВАЦ) и генератора синусоидальных сигналов Agilent PSG E8257D (ГСС). Для изоляции образца от паразитного излучения от СВЧ-оборудования, расположенного при комнатной температуре, в микроволновых линиях контроля устанавливаются аттенюаторы, а подключение к линии контроля потока на ступени 20 мК выполнено с использованием дополнительных низкочастотных порошковых фильтров на основе железа с экспоненциальным частотным откликом (показатель степени 5 дБ/ГГц).

Раздел 2.6 содержит результаты спектроскопических исследований флаксоинума и резонатора. Данные двухтоновой спектроскопии изображены на рисунке 2 при малой мощности второго (возбуждающего переходы кубита) тона. Подписи на рисунке также обозначают населенность кубита-флаксоинума (первая цифра) и населенность резонатора (вторая цифра).

Реальные значения параметров цепи из экспериментальных данных извлекались путем сравнения их с результатами численной диагонализации гамильтониана полной системы кубит-резонатор (1) и равны: $E_C = 2,090$ ГГц, $E_J = 7,050$ ГГц, $E_L = 0,346$ ГГц, $\omega_R/2\pi = 7,420$ ГГц, $g/2\pi = 200$ МГц.

В разделе 2.7 рассматривается новая модификация кубита-флаксоинума, работающего в особом режиме параметров, который обеспечивает сильную емкостную связь с основным переходом кубита. Эквивалентная электрическая схема рассматриваемой системы и топология, соответствующая реальным емкостям и индуктивностям, показаны на рисунке 3.

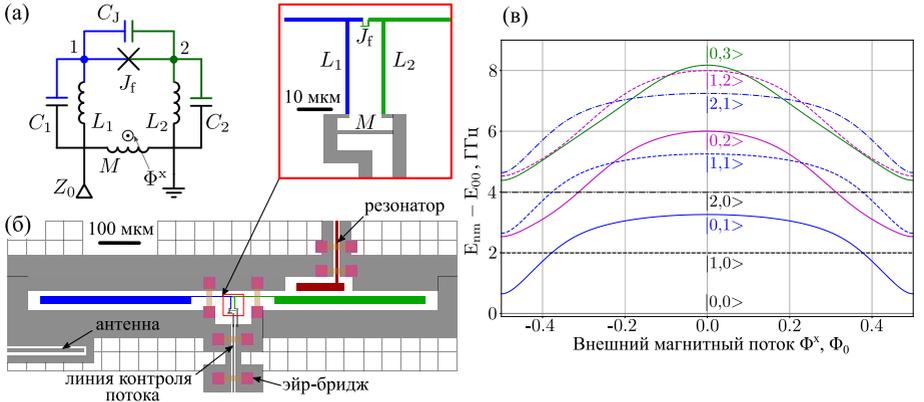


Рис. 3 — (а) Эквивалентная схема модифицированного флаксоинума, состоящего из одного джозефсоновского перехода, двух больших индуктивностей и трех конденсаторов, а также гальванической связи контура кубита с линией контроля потока. (б) Топология кубита с индивидуальным резонатором для считывания, линией контроля магнитного потока и микроволновой антенной. (в) Уровни энергии модифицированной системы в зависимости от величины внешнего магнитного потока в контуре Φ^x для $E_J = 2.24$ ГГц, $E_L = 1.64$ ГГц, $C_{1;2} = 70.1$ фФ, $C_J = 1.3$ фФ.

Модифицированная схема флаксоинума состоит из джозефсоновского перехода с энергией E_J , шунтированного емкостью C_J , и двух больших (супер-) индуктивностей L_1 и L_2 , формирующих замкнутый контур.

При отсутствии беспорядка среди элементов схемы $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$ можно записать гамильтониан в виде:

$$\hat{H} = \hat{H}_h + \hat{H}_f, \quad (2)$$

$$\hat{H}_h = 4E_{Ch}(\hat{n}^+)^2 + \frac{1}{2}E_L(\hat{\vartheta}^+ - \varphi^x)^2, \quad (3)$$

$$\hat{H}_f = 4E_{Cf}(\hat{n}^-)^2 + \frac{1}{2}E_L(\hat{\vartheta}^- - \varphi^x)^2 + E_J[1 - \cos(\hat{\vartheta}^-)], \quad (4)$$

где \hat{n}^- и \hat{n}^+ — операторы числа куперовских пар, канонически сопряженные $\hat{\vartheta}^-$ и $\hat{\vartheta}^+$, соответственно. Верхний индекс "+" принадлежит операторам, описывающим гармоническую моду с гамильтонианом \hat{H}_h . Верхний индекс "-" принадлежит операторам, описывающим нелинейную моду с гамильтонианом \hat{H}_f , совпадающим с гамильтонианом обычного флаксоинума.

Здесь также вводится безразмерная переменная для внешнего потока $\varphi^x = \frac{2\pi\Phi^x}{\Phi_0}$. Энергетические величины выражаются через параметры цепи как: $E_L = (\Phi_0/2\pi)^2/2L$, $E_{Cf} = e^2/2Cf$, где $C_f = (C + C_J)/2$, $E_{Ch} = e^2/2C_h$, где $C_h = C/2$.

Рассчитанный энергетический спектр исследуемой системы как функция внешнего потока Φ^x представлен на рисунке 3в. Выбор характерных параметров системы, используемых для расчета спектра, и сравнение с другими режимами работы проводилось путем рассмотрения двух одинаковых емкостно-связанных кубитов-флаксоhiumов, поведение которых описывается гамильтонианом:

$$\hat{H} = \sum_{\alpha=1,2} 4E_C \hat{n}_\alpha^2 + E_J \cos \hat{\varphi}_\alpha + \frac{1}{2} E_L \hat{\varphi}_\alpha^2 + 4\kappa E_C \hat{n}_1 \hat{n}_2. \quad (5)$$

где эффективный коэффициент емкостной связи $\kappa = C_C / (C + C_C)$ не может превышать 1. Отмечено, что для выбранных параметров модифицированный кубит по частоте и ангармонизму близок к обычному флаксониуму [16], а по соотношению джозефсоновской и шунтирующей индуктивностей - к режиму квартона [24]. При этом зарядовая энергия относительно высока: $E_J \sim E_L \sim 4E_C$. На рисунке 3в собственные состояния обозначены как $|n_h, n_f\rangle$, где n_h - число заполнения гармонической моды, а n_f - число заполнения моды флаксониума. Частота гармонической моды составляет 2,0 ГГц. Частота основного перехода моды флаксониума f_Q перестраивается от 625 МГц в точке вырождения потока до 3,31 ГГц при нулевом потоке. Ангармонизм моды флаксониума δf_Q в точке вырождения потока составляет около 1,911 ГГц.

В предложенной топологии линия контроля потока гальванически связана с модой флаксониума, что позволит реализовать и возбуждение, и управление частотой кубита с помощью только одной микроволновой линии в криостате растворения. Этот подход необходим для упрощения систем контроля (сокращения числа управляющих каналов) в шумных устройствах квантовой обработки информации «среднего» и «большого» масштаба (NISQ). Оценка времени релаксации в точке вырождения потока, обусловленном потоковым шумом в линии контроля, дает величину 1 мс (при выбранном для реального дизайна значении величины гальванической связи контура кубита с линией контроля магнитного потока $M = 12$ пГн).

В разделе 2.8 собраны основные выводы по главе. Разработанная модель для численного расчета связанной системы флаксониум-резонатор, а также полученные экспериментальные данные легли в основу и использовались при разработке новой модели и послойной геометрии модифицированного кубита-флаксоhiumа, а также в дальнейшем при разработке двухкубитного квантового процессора и описании квантовых биений одиночного флаксона, захваченного в двухъячеичный СКВИД, представленных в следующих главах диссертации. Предложенная оригинальная схема модифицированного кубита-флаксоhiumа открывает новые возможности построения масштабируемых квантовых процессоров

на основе низкочастотных кубитов с перестраиваемым взаимодействием. Основные результаты этой главы опубликованы в статьях [A1, A3].

Третья глава содержит сведения о разработке универсального двухкубитного квантового процессора на кубитах-флаксоиумах с перестраиваемым элементом связи, а также результаты его экспериментального исследования и демонстрации двухкубитных вентилях. Квантовый процессор является универсальным если на нем возможно реализовать универсальный набор вентилях, который любое унитарное преобразование может аппроксимировать конечной последовательностью вентилях из этого набора. Набор универсальных вентилях включает в себя однокубитные вентиля и один из двухкубитных вентилях, например CZ. Рассматриваемая система не позволяет оптимально реализовать вентиль CZ напрямую, однако допускает реализацию вентиля fSim, который использовался для построения вентиля CZ. В разделе 3.1 описан основной принцип реализации перестраиваемого взаимодействия. В этом случае и кубиты, и элемент связи выполнены в виде модифицированной двухэлектродной системы кубита-флаксоиума с дополнительной гармонической модой, представленной выше. Принципиальная схема двухкубитной системы, ее электрическая цепь и оптическое изображение устройства представлены на рисунке 4. Полный гамильтониан системы имеет вид:

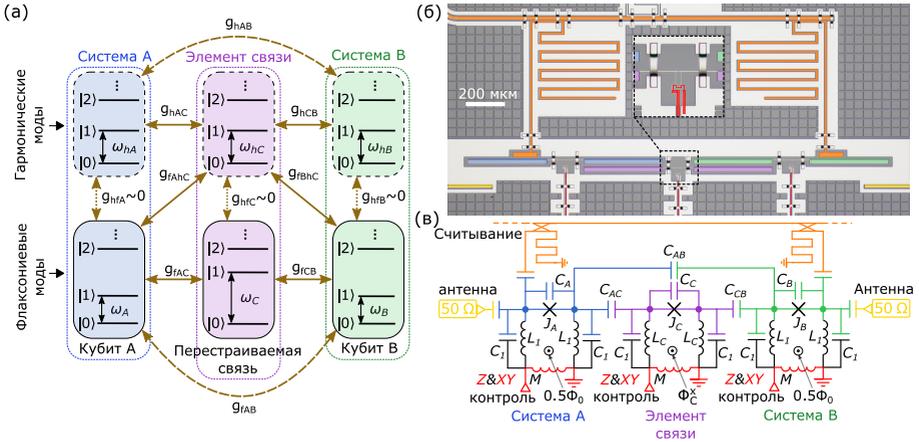
$$\hat{H}_{\text{full}} = \sum_{i=f_A, f_B, f_C} \hat{H}_i + \sum_{j=h_A, h_B, h_C} \hat{H}_j + \sum_{ij} \hat{g}_{ij}. \quad (6)$$

При этом гармонические и флаксоиновые моды подсистем описываются гамильтонианами (3) и (4), соответственно. Последнее слагаемое определяет эффективное двухкубитное взаимодействие.

Численное моделирование показывает, что магнитный поток в элементе связи может использоваться для включения и выключения эффективного поперечного XX взаимодействия (см. рисунок 5). Благодаря использованию деструктивной интерференции между разными каналами взаимодействия, удается практически полностью устранить статическое XX и ZZ взаимодействие между вычислительными кубитами вблизи точки нулевого магнитного потока в элементе связи. Эффективный низкоэнергетический гамильтониан, полученный при исключении степеней свободы элемента связи, принимает вид:

$$\hat{H}_{\text{eff}}/\hbar = -\frac{1}{2}\omega_1\sigma_1^z - \frac{1}{2}\omega_2\sigma_2^z + g_{xx}\sigma_1^x\sigma_2^x + \frac{1}{4}\zeta_{zz}\sigma_1^z\sigma_2^z, \quad (7)$$

где $\omega_{1,2}$ - фундаментальные частоты вычислительных кубитов, g_{xx} - эффективный коэффициент поперечного XX взаимодействия, ζ_{zz} - эффективный коэффициент продольного ZZ взаимодействия. Ввиду одновременного наличия и XX и ZZ взаимодействия в рассматриваемой системе естественным образом реализуется двухкубитный вентиль из семейства fSim (подобный



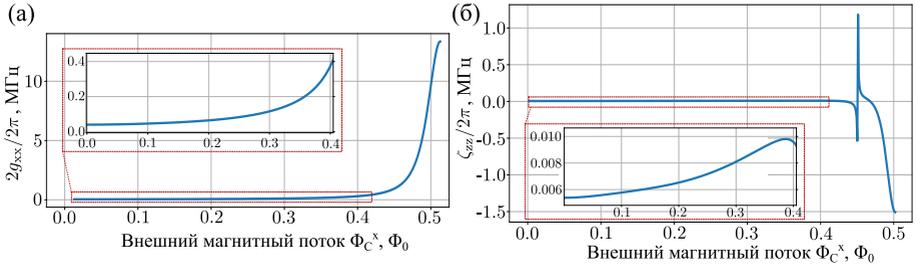
На рисунке (б) цвета (синий, фиолетовый, зеленый, оранжевый, желтый и красный) используются для обозначения соответствующих компонентов схемы (в). Нагрузка 50 Ом установлена на 10 мкК ступени криостата растворения и используются для инициализации кубитов.

Рис. 4 — (а) — Принципиальная схема взаимодействующей системы трех тел. (б) — Оптическое изображение устройства, состоящего из трех емкостно-связанных модифицированных кубитов-флаксонимов с индивидуальными микроволновыми копланарными резонаторами для считывания, изготовленных на кремниевой подложке (в ложном цвете). (в) — Схематическое изображение цепи.

вентилю iSWAP). Моделирование временной динамики системы путем численного решения уравнения Шредингера позволило оценить точность двухкубитного вентиля fSim, которая для случая одинаковых частот вычислительных кубитов и непараметрического потокового импульса дает значение $F \approx 0.9999$, а для случая разных частот кубитов — $F \approx 0.9996$. При этом использовалось стандартное выражение для точности двухкубитного вентиля.

На основе выбранных параметров была разработана послойная структура двухкубитной системы, элемент которой, содержащий двухкубитный процессор, изображен на рисунке 4б, также в структуре дополнительно присутствовал изолированный кубит «S» для проведения тестовых измерений. Экспериментальный образец был изготовлен по разработанной автором топологии в технологическом центре НОЦ ФМН в МГТУ им. Баумана группой Ильи Родионова.

Раздел 3.2 содержит результаты экспериментальных исследований двухкубитного процессора. Вычислительные кубиты работают в точке вырождения магнитного потока где их частоты находятся в диапазоне 600-750 МГц.



(а) – Величина эффективного поперечного XX взаимодействия $2g_{XX}(\Phi_C^x)$.
 (б) – ZZ взаимодействие $\zeta_{ZZ}(\Phi_C^x)$.

Рис. 5 — Эффективное взаимодействие кубитов как функция магнитного потока в элементе связи.

Здесь также представлены результаты вспомогательных измерений и калибровок. Так как кубиты имеют низкие частоты основного перехода, был предложен и реализован механизм безусловной инициализации кубитов в основном состоянии, для чего используются емкостно связанные с кубитами микроволновые антенны в качестве спроектированного управляемого канала рассеяния. При такой инициализации видность считывания для кубита «А», кубита «В» и кубита «S» составила 87%, 89% и 96% соответственно. Измеренные в точке вырождения магнитного потока времена когерентности вычислительных кубитов «А» и «В», входящих в процессор, T_2^* и T_2^E превышают 50 мкс и 90 мкс соответственно, а времена жизни T_1 - 80 мкс. Для изолированного кубита «S» удалось получить время жизни $T_{1,S} = 172$ мкс и времена когерентности $T_{2,S}^* = 113$ мкс $T_{2,S}^E = 146$ мкс. Наконец, были проведены измерения перекрестных наводок, среднее значение перекрестных наводок между кубитом и линиями контроля потока соседнего кубита и элемента связи составила около 0,25%.

Показано (см. рисунок 6), что используемая схема с перестраиваемым элементом связи позволяет подавить остаточное статическое ZZ -взаимодействие (здесь менее 1 кГц) и достичь средней точности однокубитных вентилях выше 99,97% (рисунок 7), с использованием гауссовых возбуждающих импульсов длительностью 13,3 нс. Исследуемая схема позволила реализовать ресурсосберегающее управление кубитами (смещение магнитного потока в контуре кубита, для управления его частотой, и возбуждение кубита осуществляется по одной линии управления) с одним каналом генератора сигналов произвольной формы (AWG) на каждый кубит.

Представленная в работе реализация двухкубитного вентиля подобного \sqrt{i} SWAP (то есть $f\text{Sim}(\frac{\pi}{4}, \varphi)$) основана на одновременном применении параметрически модулированного потокового Z -импульса к кубиту «В» и потокового импульса к элементу связи, амплитуда которого калибруется путем измерения населенности состояний $|01\rangle$ и $|10\rangle$. Результат наблюдения эффективного XX взаимодействия представлен на рисунке 8.

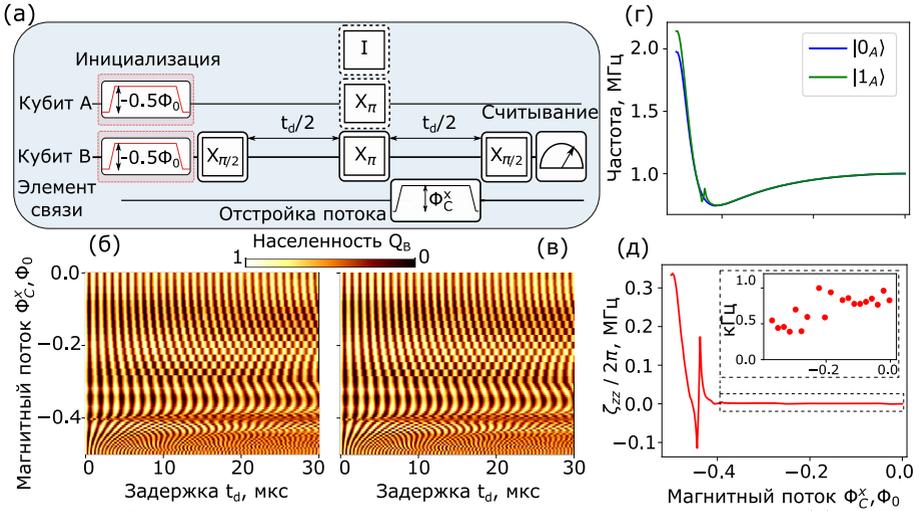


Рис. 6 — Результаты измерения величины ZZ-взаимодействия. (а) — Последовательность импульсов для проведения эксперимента по наблюдению спинового эха на кубите «В» при инициализации кубита «А» в его основном (промежуточный вентиль I) и возбужденном (промежуточный вентиль X_{π}) состоянии. Фаза модуляции заключительного $\pi/2$ -импульса пропорциональна величине задержки. (б) — Результат измерения населенности кубита «В» (без подачи π -импульса на кубит «А») в зависимости от времени задержки и амплитуды потокового импульса на элемент связи. (в) — Результат измерения населенности кубита «В» (без подачи π -импульса на кубит «А») в зависимости от времени задержки и амплитуды потокового импульса на элемент связи. (г) — Частота осцилляций спинового эха кубита «В» в зависимости от амплитуды потокового импульса Φ_C^x , подающегося на элемент связи. Синяя кривая соответствует случаю, когда на кубит «А» подается промежуточный вентиль I , а зеленая кривая - на кубит «А» подается промежуточный вентиль X_{π} параллельно с π -импульсом на кубит «В». (д) — Величина ZZ-взаимодействия ζ_{zz} как функция Φ_C^x . Вложенная картинка показывает значения ζ_{zz} вблизи точки нулевого потока в элементе связи.

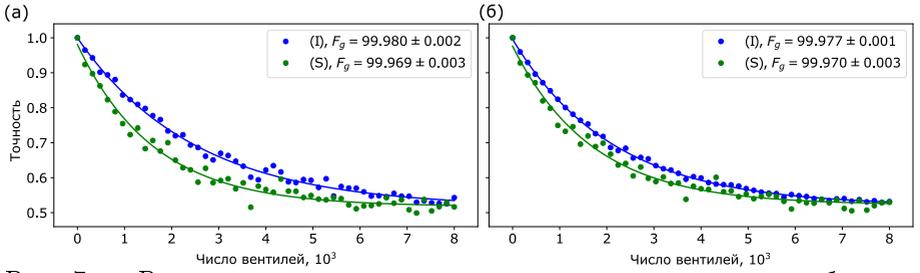


Рис. 7 — Результаты рандомизированного тестирования однокубитных вентилях на кубите «А» и кубите «В». (а), (б) — Зависимость точности однокубитных вентилях, усредненной по группе Клиффорда, от длины последовательности для кубитов «А», «В», соответственно. (I) обозначает изолированное применение однокубитных Клиффордов и изолированное считывание кубитов «А» и «В». (S) обозначает одновременное применение однокубитных Клиффордов и одновременное считывание кубитов «А» и «В». Средняя точность вентиля из группы Клиффорда, полученная из оценки методом наименьших квадратов. Данные усредняются по 20 случайным реализациям для каждой длины последовательности.

При помощи процедуры перекрестно-энтропийного тестирования (ХЕВ) [12] была продемонстрирована точность $99,55 \pm 0,04\%$ двухкубитного параметрического вентиля fSim длительностью 60 нс. Также был реализован и продемонстрирован двухкубитный вентиль CZ с точностью $99,23 \pm 0,04\%$ и длительностью 183,3 нс (рисунок 9). Последовательность импульсов для реализации вентиля CZ состоит из двух вентилях fSim и пяти однокубитных вентилях и реализует протокол спинового эха для устранения условного набега фазы, происходящего во время вентиля fSim.

В разделе 3.3 содержатся основные выводы по главе. Архитектура процессора с перестраиваемым элементом связи, дала возможность не только реализовать двухкубитные вентиля с высокой точностью, но и подавить остаточное паразитное ZZ-взаимодействие, что также позволило продемонстрировать параллельные однокубитные операции с высокой точностью (падение точности ондокубитных операций при одновременном тестировании двух кубитов в сравнении с независимым тестированием кубитов составило в среднем около 0.01 % что существенно лучше в сравнении с процессорами без перестраиваемых элементов связи). Полученные результаты раскрывают интересный и многообещающий подход к отказоустойчивым квантовым вычислениям с низкочастотными кубитами, которые могут стать конкурентоспособной альтернативой сверхпроводниковым процессорам на кубитах-трансмонах. Очевидно, что низкая частота вычислительных кубитов открывает возможность использования субгигагерцовой электроники и линий управления как для вентилях операций над кубитами, так и для индивидуального контроля их частоты, что, в свою

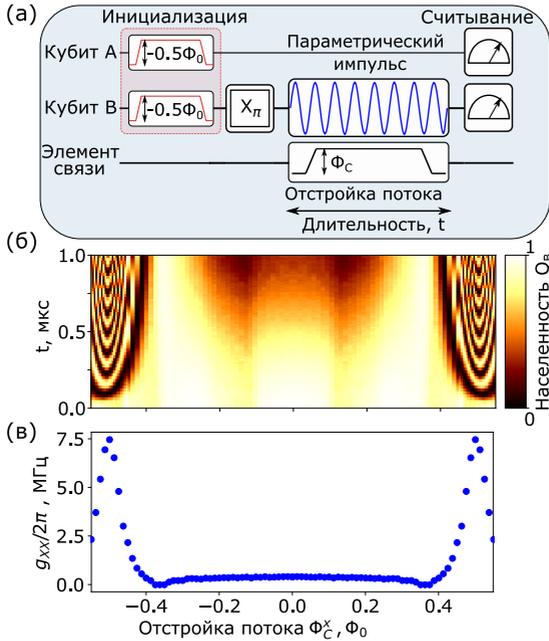


Рис. 8 — Наблюдение ХХ-взаимодействия. (а) — Последовательность импульсов для измерения величины взаимодействия кубитов при параметрической модуляции (кубит «В» приводится в резонанс с кубитом «А» в зависимости от амплитуды потокового импульса, подаваемого на элемент связи. (б) — Результаты наблюдения обмена энергией между состояниями $|10\rangle$ и $|01\rangle$ как функции амплитуды потокового импульса Φ_C^x на элемент связи. (в) — Эффективное ХХ-взаимодействие g_{xx} в зависимости от Φ_C^x .

очередь, позволяет значительно уменьшить сложность системы управления процессором за счет использования одной гальванически связанной линии контроля потока для каждого кубита. Результаты экспериментальных исследований двухкубитного процессора подготовлены к публикации в работе [22].

Четвертая глава посвящена исследованию когерентного макроскопического квантово-механического явления — квантовым биениям одиночного магнитного флаксона, захваченного в двухъячеечный СКВИД с высокой кинетической индуктивностью. Магнитный флаксон представляет собой топологически устойчивое возбуждение, вихрь постоянного тока, который несет квант магнитного потока Φ_0 . В разделе 4.1 кратко приводятся литературные сведения о наблюдаемых ранее явлениях, связанных с классической динамикой флаксонів, а также о различных когерентных макроскопических квантовых явлениях, наблюдаемых в сверхпроводниковых квантовых цепях и кубитах. Также здесь формируется предложение

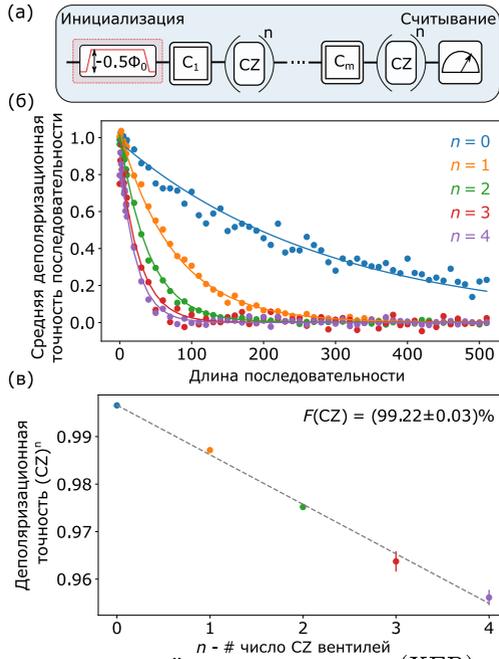
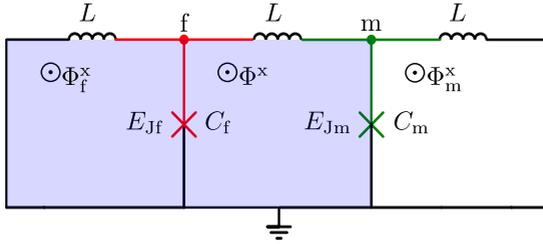


Рис. 9 — Перекрестно-энтропийное тестирование (ХЕВ) двухкубитного вентиля CZ. (а) — Последовательность импульсов. (б) — Деполаризационная точность последовательностей с разным числом ($n = 0 \div 4$ - обозначены цветом) промежуточных вентилях CZ. Данные усредняются по 100 случайным реализациям для каждой длины последовательности. (в) Точность выполнения n двухкубитных вентилях (CZ^n) в зависимости от числа n . Линейная зависимость свидетельствует о некогерентных ошибках.

по исследованию квантовой динамики флаксонов в джозефсоновской передающей линии (ДПЛ), состоящей из параллельных джозефсоновских переходов, соединенных индуктивностями. Для реализации такой платформы необходимо использовать достаточно маленькие джозефсоновские переходы, такие, чтобы их энергия Джозефсона была сравнима с их зарядовой энергией, а для уменьшения размера флаксона до размера одной ячейки требуются высокие кинетические индуктивности, образованные либо цепочками классических джозефсоновских контактов [16], либо неупорядоченными сверхпроводящими материалами [17], аналогично подходу, используемому для изготовления кубитов-флаксонов. Такие ДПЛ могут быть сопоставлены с широким классом моделей одномерных решёток с сильной связью и, тем самым, представляют собой интересную платформу для квантового моделирования защищенных симметрией топологических возбуждений. Гамильтониан такой системы для одночастичной



L – кинетические индуктивности; Φ_f^x , Φ^x and Φ_m^x – внешние магнитные поля в левой, центральной и правой ячейках СКВИДа, соответственно. Рис. 10 — Эквивалентная схема с сосредоточенными элементами рассматриваемого трехъячеечного СКВИДа. Красным обозначен левый джозефсоновский контакт «f», зеленым – правый джозефсоновский контакт «m».

задачи с взаимодействием только между ближайшими соседями принимает вид:

$$\hat{H}_{tb} = \sum_{i=0}^{N-1} e_i |i\rangle \langle i| + \sum_{i=0}^{N-2} t_i |i\rangle \langle i+1|, \quad (8)$$

где $|i\rangle$ обозначает однофлаксонное состояние в i -й ячейке; e_i - энергии флаксона в i -й; t_i - амплитуда макроскопического квантового туннелирования флаксона между соседними ячейками ($t_i \propto \exp(-\sqrt{8E_{Ji}/EC_i})$)

В разделе 4.2 представлена модель для описания трехъячеечного СКВИДа с высокой кинетической индуктивностью и двумя маленькими джозефсоновскими контактами, эквивалентная электрическая схема которой приведена на рисунке 10. Левый (электрод «f» отмечен красными линиями на рисунке) и правый (электрод «m» отмечен зелеными линиями) джозефсоновские переходы характеризуются джозефсоновскими энергиями E_{Jf} и E_{Jm} , соответственно, а также большими шунтирующими емкостями $C_f = C_m = C$. Джозефсоновские переходы связаны сверхпроводниковыми петлями с высокой кинетической индуктивностью L (для простоты мы считаем их одинаковыми). Внешние магнитные поля Φ_f^x , Φ^x , Φ_m^x пронизывают левую, центральную и правую ячейки СКВИДа, соответственно.

Полный гамильтониан рассмотренной цепи сводится к следующей форме:

$$\hat{H} = \hat{H}_F + \hat{H}_M + \hat{H}_I, \quad (9)$$

$$\hat{H}_F = \frac{\hat{Q}_f^2}{2C} + E_{Jf}[1 - \cos \hat{\varphi}_f] + \frac{\Phi_0^2}{L(2\pi)^2} (\hat{\varphi}_f - \pi\Phi_{\Delta f}/\Phi_0)^2 + \frac{(\Phi_{\Sigma f})^2}{2L}, \quad (10)$$

$$\hat{H}_M = \frac{\hat{Q}_m^2}{2C} + E_{Jm}[1 - \cos \hat{\varphi}_m] + \frac{\Phi_0^2}{L(2\pi)^2} (\hat{\varphi}_m - \pi\Phi_{\Delta m}/\Phi_0)^2 + \frac{(\Phi_{\Sigma m})^2}{2L}, \quad (11)$$

$$\hat{H}_1 = -\frac{\Phi_0^2}{L(2\pi)^2} \hat{\varphi}_f \hat{\varphi}_m. \quad (12)$$

Как видно, гамильтониан состоит из трех частей: \hat{H}_F (\hat{H}_M) – это гамильтониан независимого двухъячеечного СКВИДа с внешними магнитными потоками (две крайние левые (крайние правые) ячейки на рисунке 10); гамильтониан \hat{H}_1 описывает индуктивное взаимодействие между системами F и M . Здесь также введены обозначения для различных комбинаций внешних магнитных полей: $\Phi_{\Delta f} = \Phi^x - \Phi_f^x$, $\Phi_{\Sigma f} = \Phi_f^x + \Phi^x$, $\Phi_{\Delta m} = \Phi_m^x - \Phi^x$ и $\Phi_{\Sigma m} = \Phi^x + \Phi_m^x$.

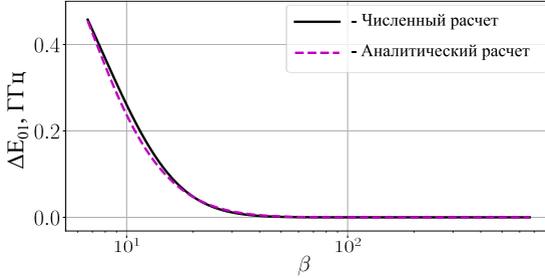
В разделе 4.3 отдельно рассмотрена система, описываемая гамильтонианом \hat{H}_F и представляющая собой двухъячеечный СКВИД (крайние левые ячейки на рисунке 10). В такой системе квантовая динамика двух низколежащих собственных состояний может быть описана в базисе местоположения флаксона с двумя состояниями, $|L\rangle$ и $|R\rangle$. В этом базисе гамильтониан одиночного флаксона имеет известную однокубитную форму:

$$\hat{H}_{2\text{cells-MF}} = \frac{\Delta}{2} \hat{\sigma}^x + \frac{\epsilon}{2} \hat{\sigma}^z, \quad (13)$$

где $\epsilon_0 = \delta\Phi_{\Delta f} \frac{\Phi_0}{2L}$. Этот гамильтониан определяет расщепление энергетических уровней как $\Delta E_{01} = \sqrt{\Delta^2 + \epsilon^2}$.

Численно и аналитически была получена величина расщепления ΔE_{01} низколежащих уровней энергии для одного флаксона, захваченного в такой СКВИД, и соответствующая частота квантовых биений флаксона (когерентным колебаниям амплитуды вероятности) $f_{qb} = \Delta E_{01}/h$. Полученные результаты представлены на рисунке 11. Из анализа следует, что когерентное квантовое туннелирование флаксонов может быть повышено при работе в режиме, когда E_{Jf} больше или сравнимо с E_C , либо наоборот сильно подавлено, когда $E_{Jf} \gg E_C$, а сам флаксон при этом локализуется в одной из ячеек СКВИДа.

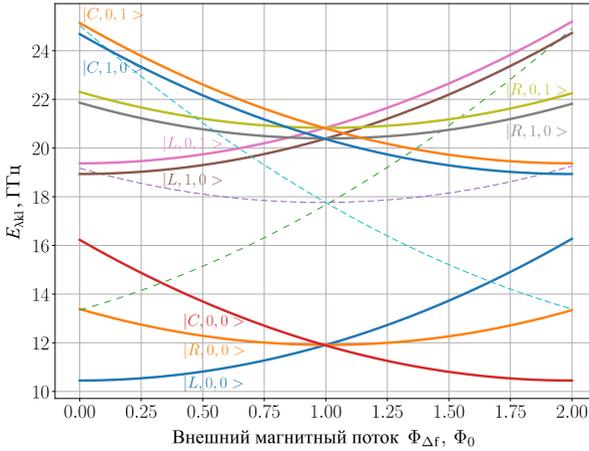
В разделе 4.4 проведен анализ квантовой динамики одиночного флаксона захваченного в трехъячеечном СКВИДе ((9)-(12)). Захваченный флаксон демонстрирует два квантово-механических эффекта, а именно когерентное квантовое туннелирование между соседними ячейками и возбуждения плазменных колебаний в джозефсоновских контактах, «f» и «m». Спектр системы изображен на рисунке 12. Низколежащие собственные значения и соответствующие им собственные состояния гамильтониана \hat{H} (9) на однофаксонном многообразии удобно описывать в базисе собственных состояний, обозначенных как $|\lambda, k, \ell\rangle = |\lambda\rangle \otimes |k\rangle_f \otimes |\ell\rangle_m$, где λ определяет положение флаксона в левой (L), центральной (C) или правой (R) ячейке; k и ℓ – населенность плазменных мод, связанных с переменными φ_f и φ_m соответственно.



Сплошная линия – результаты численного расчета; пунктирная линия – аналитический расчет. Параметры системы, выбранные для расчета:

$$E_C/h = 1 \text{ ГГц}, E_L/h = 0.15 \text{ ГГц} \text{ и } E_{Jf}/h = 1 \div 100 \text{ ГГц}.$$

Рис. 11 – Зависимость величины расщепления уровней энергии $\Delta = \Delta E_{01}(\Phi_{\Delta f} = 1.0\Phi_0)/h$ вырожденных состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$ от параметра β .



Параметры системы, выбранные для расчета: $E_{Jf}/h = 20 \text{ ГГц}$,

$E_{Jm}/h = 22 \text{ ГГц}$, $E_C/h = 0.5 \text{ ГГц}$, and $E_L/h = 0.15 \text{ ГГц}$. Пунктирными кривыми показаны уровни энергии, соответствующие случаю, когда в системе присутствуют два флюксона или один анти-флюксон.

Рис. 12 – Спектр $E_{\lambda k, \ell}$ системы с одним захваченным магнитным флюксоном в зависимости от разности магнитного потока в левой и правой ячейках СКВИДа $\Phi_{\Delta f}$.

Анализ спектра, представленного на рисунке 12, позволяет заметить своеобразный эффект. В точке вырождения потока переходы системы, связанные с возбуждением плазменных мод в джозефсоновском контакте «f», имеют следующие частоты: $E_{|L,0,0\rangle \rightarrow |L,1,0\rangle} = E_{|C,0,0\rangle \rightarrow |C,1,0\rangle} \approx 8,4771$ ГГц, но $E_{|R,0,0\rangle \rightarrow |R,1,0\rangle} \approx 8,4844$ ГГц. Это говорит о том, что плазменные моды, возбуждаемые в джозефсоновском переходе «f», имеют одинаковые частоты для флаксона, локализованного в левой и центральной ячейках, но частота плазменной моды для флаксона, локализованного в правой ячейке, немного (на 7.3 МГц) выше. Аналогично, переходы, связанные с возбуждением плазменных мод в джозефсоновском контакте «m», имеют частоты: $E_{|C,0,0\rangle \rightarrow |C,0,1\rangle} = E_{|R,0,0\rangle \rightarrow |R,0,1\rangle} \approx 8,9181$ ГГц, но $E_{|L,0,0\rangle \rightarrow |L,0,1\rangle} \approx 8,9242$ ГГц. То есть, плазменные моды, возбуждаемые в джозефсоновском переходе «m», имеют одинаковые частоты для флаксона, локализованного в центральной и правой ячейках, но частота плазменной моды для флаксона, локализованного в левой ячейке, на 6,1 МГц выше. Одночастичная (однофлаксонная) задача может быть описана с помощью упрощенного гамильтониана двух кубитов-трансонов, связанных с кутритом:

$$\hat{H}_{Qb-Qtr} = \frac{1}{2}\hbar\omega_{pf}\hat{\sigma}_f^z + \frac{1}{2}\hbar\omega_{pm}\hat{\sigma}_m^z + \epsilon_L |L\rangle \langle L| + \epsilon_C |C\rangle \langle C| + \epsilon_R |R\rangle \langle R| + J_f^z \hat{\sigma}_f^z |R\rangle \langle R| + J_m^z \hat{\sigma}_m^z |L\rangle \langle L|, \quad (14)$$

где $\hbar\omega_{pf(m)} \simeq \sqrt{8E_{Jf(m)}E_C}$ - плазменные частоты джозефсоновских переходов «f» и «m», $\hat{\sigma}_\alpha^{x,y,z}$ - матрицы Паули соответствующие кубитам-трансонам «f»- ($\alpha = f$) и «m»- ($\alpha = m$). Индекс λ ($\lambda = L, C, R$) - обозначает состояния кутрита, а ϵ_L , ϵ_C и ϵ_R - зависящие от разности магнитного потока состояний $|L\rangle$, $|C\rangle$ и $|R\rangle$, соответственно. При этом $J_f^z/h = 7,3$ МГц и $J_m^z/h = 6,1$ МГц. Другими словами, флаксон, находящийся в крайней левой ячейке, изменит плазменную частоту перехода «m», а флаксон, находящийся в самой правой ячейке, изменит плазменную частоту перехода «f». Это дает возможность применить традиционную технику неразрушающего считывания [8] кубитов-трансонов для того, чтобы различать состояния флаксонов в разных ячейках. Предлагаемый метод реализации такого дисперсионного считывания должен состоять из двух частей. Во-первых, калибруются последовательности импульсов (КПИ) в схеме наблюдения осцилляций Рамзея, такая процедура аналогична калибровке двухкубитного вентиля CZ, в котором ZZ взаимодействие двух кубитов приводит к смещению частоты одного кубита в зависимости от состояния другого. В отличие от вентиля CZ, в рассматриваемой системе каждый из кубитов-трансонов («f» и «m») связан с кутритом. Во-вторых, полученные последовательности КПИ в дальнейшем применяются для условного вращения состояния кубитов-трансонов («f» и «m»), как показано на рисунке 13. Результаты таких измерений позволяют однозначно определить

- считывающим резонатором копланарного типа. Численная модель для расчета гамильтониана системы позволила извлечь реальные параметры изготовленного устройства. Полученные данные использовались при выполнении следующих этапов работ диссертации.
2. Предложена и экспериментально продемонстрирована оригинальная схема сверхпроводникового кубита-флаксоинума с гальванически встроенной линией контроля магнитного потока в копланарной архитектуре, пригодная к использованию как в качестве вычислительного кубита, так и в качестве перестраиваемого элемента связи при создании многокубитных квантовых систем. В исследуемом экспериментальном образце, содержащем такую изолированную модифицированную систему, удалось получить время жизни кубита $T_{1,S} = 172$ мкс и времена дефазировки $T_{2,S}^* = 113$ мкс $T_{2,S}^E = 146$ мкс.
 3. Предложен и реализован метод инициализации кубитов с низкой частотой основного перехода $\hbar\omega_{01} \leq k_B T$ в их основном состоянии. Для этой цели использовался специально спроектированный управляемый канал рассеяния в виде емкости связанной с кубитом микроволновой антенны, подключенной к нижней ступени криостата растворения посредством 50Ω нагрузки. Данный метод позволил получить точность считывания для кубитов «А», «В» и «S» около 87%, 89% и 96% соответственно.
 4. Разработан и экспериментально исследован образец двухкубитного квантового процессора на основе модифицированных кубитов-флаксоинумов. Реализован двухкубитный параметрический вентиль fSim с точностью 99,55%. На его основе реализован двухкубитный вентиль CZ с точностью 99,23%. Для измерения точности двухкубитных вентилей экспериментально реализован алгоритм для перекрестно-энтропийного тестирования. Средняя точность однокубитных вентилей из группы Клиффорда, измеренная при помощи рандомизированного тестирования, превышает 99,97%.
 5. Предложен метод дисперсионного считывания для детектирования положения одиночного флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов на основе высокой кинетической индуктивности. Метод основан на сдвиге частот плазменных мод джозефсоновских контактов, играющих роль слабой связи между ячейками массива, и позволяет проводить измерения динамики квантовых флаксонов, захваченных в таком массиве, с временным разрешением.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Planar Architecture for Studying a Fluxonium Qubit [Текст] / I. N. Moskaleiko [et al.] // *Jetp Lett.* — 2019. — Vol. 110, no. 8. — P. 574—579. — (Scopus, WoS).
- A2. Quantum beats of a magnetic fluxon in a two-cell SQUID [Текст] / I. N. Moskaleiko [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2021. — Vol. 103, no. 22. — P. 224528. — (Scopus, WoS).
- A3. Tunable coupling scheme for implementing two-qubit gates on fluxonium qubits [Текст] / I. N. Moskaleiko [et al.] // *Applied Physics Letters.* — 2021. — Vol. 119, no. 19. — P. 194001. — (Scopus, WoS).

Список литературы

1. *Gershenfeld, N. A.* Bulk Spin-Resonance Quantum Computation [Текст] / N. A. Gershenfeld, I. L. Chuang // *Science.* — 1997. — Vol. 275, no. 5298. — P. 350—356.
2. Coherent Dynamics of Coupled Electron and Nuclear Spin Qubits in Diamond [Текст] / L. Childress [et al.] // *Science.* — 2006. — Vol. 314, no. 5797. — P. 281—285.
3. *Saffman, M.* Quantum information with Rydberg atoms [Текст] / M. Saffman, T. G. Walker, K. Molmer // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Aug. — Vol. 82, issue 3. — P. 2313—2363.
4. Quantum dynamics of single trapped ions [Текст] / D. Leibfried [et al.] // *Rev. Mod. Phys.* — 2003. — Mar. — Vol. 75, issue 1. — P. 281—324.
5. *Nakamura, Y.* Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box [Текст] / Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai // *Nature.* — 1999. — Apr. — Vol. 398. — P. 786—788.
6. Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation [Текст] / A. Blais [et al.] // *Physical Review A.* — 2004. — arXiv: [0402216](https://arxiv.org/abs/0402216) [[cond-mat](#)].
7. *Schoelkopf, R.* Wiring up quantum systems [Текст] / R. Schoelkopf, S. Girvin // *Nature.* — 2008. — Vol. 451. — P. 664—669.
8. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box [Текст] / J. Koch [et al.] // *Phys. Rev. A.* — 2007. — Oct. — Vol. 76, issue 4. — P. 042319.
9. Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits [Текст] / T. Yamamoto [et al.] // *Nature.* — 2003. — Oct. — Vol. 425, no. 6961. — P. 941—944.

10. Controlling the spontaneous emission of a superconducting transmon qubit [Текст] / A. A. Houck [et al.] // Physical Review Letters. — 2008. — Aug. — Vol. 101, no. 8. — P. 080502. — arXiv: [0803.4490](https://arxiv.org/abs/0803.4490).
11. New material platform for superconducting transmon qubits with coherence times exceeding 0.3 milliseconds [Текст] / A. P. M. Place [et al.] // Nat Commun. — 2021. — July. — Vol. 12, issue 1. — P. 1779.
12. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor [Текст] / F. Arute [et al.] // Nat Commun. — 2019. — Oct. — Vol. 574, issue 7779. — P. 505—510.
13. Strong Quantum Computational Advantage Using a Superconducting Quantum Processor [Текст] / Y. Wu [et al.] // Physical Review Letters. — 2021. — Oct. — Vol. 127, no. 18. — P. 180501. — arXiv: [2106.14734](https://arxiv.org/abs/2106.14734).
14. Demonstrating a Continuous Set of Two-Qubit Gates for Near-Term Quantum Algorithms [Текст] / B. Foxen [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Sept. — Vol. 125, issue 12. — P. 120504.
15. Realization of High-Fidelity CZ and ZZ -Free iSWAP Gates with a Tunable Coupler [Текст] / Y. Sung [et al.] // Physical Review X. — 2021. — arXiv: [2011.01261](https://arxiv.org/abs/2011.01261).
16. Fluxonium: Single Cooper-Pair Circuit Free of Charge Offsets [Текст] / V. E. Manucharyan [et al.] // Science. — 2009. — Vol. 326, no. 5949. — P. 113—116.
17. Circuit quantum electrodynamics of granular aluminum resonators [Текст] / N. Maleeva [et al.] // Nat Commun. — 2018. — Sept. — Vol. 9, no. 3889.
18. Universal Fast-Flux Control of a Coherent, Low-Frequency Qubit [Текст] / H. Zhang [et al.] // Phys. Rev. X. — 2021. — Jan. — Vol. 11, issue 1. — P. 011010.
19. Millisecond coherence in a superconducting qubit [Текст] / A. Somoroff [et al.]. — 2021.
20. Fast Logic with Slow Qubits: Microwave-Activated Controlled-Z Gate on Low-Frequency Fluxoniums [Текст] / Q. Ficheux [et al.] // Phys. Rev. X. — 2021. — May. — Vol. 11, issue 2. — P. 021026.
21. Fluxonium: an alternative qubit platform for high-fidelity operations [Текст] / F. Bao [et al.]. — 2021. — Nov. — arXiv: [2111.13504](https://arxiv.org/abs/2111.13504).
22. High fidelity two-qubit gates on fluxoniums using a tunable coupler [Текст] / I. N. Moskalenko [et al.]. — 2022. — URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.16302>.

23. *Besedin, I.* Quality factor of a transmission line coupled coplanar waveguide resonator [Текст] / I. Besedin, A. Menushenkov // EPJ Quantum Technol. — 2018. — Jan. — Vol. 5, issue 1. — P. 2.
24. Engineering Framework for Optimizing Superconducting Qubit Designst [Текст] / F. Yan [et al.]. — 2020.

Москаленко Илья Николаевич

Квантовая электродинамика сверхпроводниковых структур на основе кубитов-флакониумов

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук