

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ИФТТ РАН



чл.-корр. РАН А.А. Левченко

31 октября 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Москаленко Ильи Николаевича по теме «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых структур на основе кубитов-флаксоуиумов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертация И.Н. Москаленко посвящена реализации и исследованию макроскопических когерентных квантовых структур – кубитов-флаксоуиумов, которые являются новым типом искусственных атомов на основе сверхпроводников. Такие системы имеют перспективу использования в качестве базовых элементов – кубитов для создания сверхпроводниковых квантовых процессоров или квантовых симуляторов.

Актуальность темы исследования

Проектирование сверхпроводниковых квантовых электрических цепей и реализация квантовых вычислений и симуляций при помощи сверхпроводниковых кубитов получила широкое развитие в последнее десятилетие во всем мире. Часть задач, решаемых в данной области, сводятся к увеличению числа кубитов в квантовых процессорах, и здесь наибольших успехов добились большие фирмы, такие как Google, IBM и другие, использующие в качестве базовых элементов кубиты-трансоны. Задачи академических исследований чаще всего направлены на поиск альтернативных подходов к построению квантовых процессоров, а также

на поиск более перспективных физических систем, которые будут использоваться в качестве кубитов и будут демонстрировать лучшие точности квантовых вентильных операций и обладать более простой системой управления. Актуальность диссертационной работы определяется потенциально существенно большими временами когерентности (временами жизни квантовых состояний) исследованных в работе кубитов-флаксоунов по сравнению с кубитами-трансмонами, широко используемыми в настоящее время для реализации квантовых вентильных операций. Таким образом, тема диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Структура, объем и содержание диссертации

Представленная диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 91 наименования и 2 приложений. Она основана на 3 научных работах, опубликованных в ведущих физических журналах, входящих в перечень ВАК, а также трудах международных и российских конференций. Полный объем диссертации составляет 171 страницу, включая 72 рисунка и 2 таблицы. Все главы диссертации взаимосвязаны, представленный материал логично изложен и структурирован.

Во введении диссертации обоснована актуальность выбранной темы работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования.

В первой главе представлены основные принципы построения макроскопических квантово-механических систем, дан обзор известных к настоящему времени типов сверхпроводниковых кубитов, представлены их эквивалентные электрические схемы и характерные гамильтонианы.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию отдельных кубитов-флаксоунов, связанных со считывающими копланарными резонаторами. Для реализации новой модифицированной модели кубита-флаксоуна были развиты методы расчета характеристик и проектирования кубитов на основе джозефсоновской индуктивности цепочки джозефсоновских переходов, связанных с индивидуальным микроволновым резонатором, в копланарной архитектуре. Была

также разработана оригинальная экспериментальная схема с гальванически встроенной линией контроля магнитного потока, позволяющая производить как микроволновое возбуждение на частотах ниже 1 ГГц, так и управление частотой кубита с помощью одной микроволновой линии в криостате растворения при температурах ниже 30 мК. Продемонстрированы высокие времена когерентности отдельных кубитов и высокая точность выполнения однокубитных операций.

В третьей главе приведены результаты разработки двухкубитного квантового процессора на кубитах-флаксонах с перестраиваемым элементом связи, которые показывают, что, предложенная схема на основе емкостно-связанных кубитов-флаксонов с частотой основного перехода менее 1 ГГц открывает новые возможности построения масштабируемых квантовых процессов на основе низкочастотных кубитов. В частности, на одном устройстве были реализованы двухкубитные вентильные операции f SIM и CZ с точностью выше 99%.

Четвертая глава представляет модельные исследования когерентного макроскопического квантового явления, связанного с квантовыми биениями магнитного флаксона (кванта магнитного потока) в цепочке кубитов на основе скиндов с высокой кинетической индуктивностью. Выполнен теоретический анализ квантовой динамики одиночного флаксона, захваченного в трехъячеечном скинде. Предложен экспериментальный протокол детектирования положения одиночного флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов на основе сдвига частот плазменных мод джозефсоновских контактов, являющегося следствием квантового туннелирования флаксона через элемент слабой связи. Такой подход впервые позволяет проводить исследования квантовой динамики флаксона с временным разрешением.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, которые свидетельствуют о том, что в работе теоретически и экспериментально исследованы новые типы квантовых когерентных систем на основе структур с большой джозефсоновской или кинетической индуктивностью, развиты новые теоретические и экспериментальные приемы, проведено сравнение расчетных и

экспериментальных результатов. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано как на хорошем владении диссертантом теоретическими методами, так и на использовании современных достижений технологии тонкопленочных структур и методов низкотемпературных микроволновых измерений.

Научная новизна работы определяется полученными соискателем результатами, среди которых наибольший интерес представляют следующие:

- разработана и исследована оригинальная схема кубита на основе высокой индуктивности линейного массива джозефсоновских контактов в копланарной архитектуре, позволившая упростить систему контроля кубита до использования всего одного канала управляющего генератора и при этом сохранить высокие точности однокубитных операций;
- впервые разработана и продемонстрирована схема двухкубитного квантового процессора с перестраиваемым элементом связи на кубитах с частотой основного перехода ниже 1 ГГц, которая легко масштабируется и применима для создания многокубитных устройств;
- впервые предложен метод детектирования положения одиночного квантового флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов, что представляет большой интерес для реализации альтернативных подходов квантовых вычислений и симуляций, так как позволяет проводить исследования квантовой динамики таких флаксонов с временным разрешением.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных кубитов с гальванически встроенной линией контроля, а также схемы реализации перестраиваемого взаимодействия посредством управляемого элемента связи, для создания многокубитных квантовых систем на их основе, обладающих большей точностью вентильных операций и менее чувствительных к электромагнитным помехам в отличие от широко-используемых кубитов-трансмонов.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

- В диссертации представлены детальные численные расчеты и теоретический анализ параметров и характеристик разработанных кубитов и двухкубитных систем, на основании которых достигнуты довольно высокие времена когерентности и точности выполнения квантовых операций. Однако, в выводах отсутствует конкретный анализ природы наблюдаемой высокой шумовой температуры, других факторов, помех и нестабильностей в системе, приводящих к ограничениям указанных характеристик, не намечены возможные конкретные пути достижения более высоких времен когерентности и фиделити квантовых операций.
- Последняя четвертая глава диссертации оставляет впечатление незаконченности, поскольку после детального теоретического анализа и обсуждения конкретного экспериментального протокола исследований когерентной квантовой динамики магнитного флуксона в цепочке сквидов хотелось бы увидеть хотя бы предварительные эксперименты, свидетельствующие о возможности реализации нового типа сверхпроводникового кубита.
- В тексте диссертации присутствуют неточности и опечатки, на которые указано автору, а также не вполне традиционные и неоднозначные в понимании выражения и термины типа «комплексно-значная амплитуда прохождения», «резонатор можно считать высокочастотным» и т.п.

Сделанные замечания имеют характер пожеланий или относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо структурирована и объединяет большой объем связанных теоретических и экспериментальных результатов. В работе подробно представлены теоретическое описание и используемые экспериментальные методики. Диссертация не имеет критических недостатков, которые могли бы препятствовать ее успешной защите.

Заключение по диссертационной работе

В целом диссертация Ильи Николаевича Москаленко «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых структур на основе кубитов-флаксоунов», выполнена и изложена на высоком теоретическом и экспериментальном уровне и по актуальности темы, научной новизне, практической значимости результатов, обоснованности сделанных выводов и уровню исполнения является законченным исследованием, содержащим решение нескольких важных и взаимосвязанных научных задач. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений и подтверждаются надежностью использованных методов и согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели и задачи исследования достигнуты, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Результаты диссертационной работы обсуждены на российских и международных конференциях и достаточно полно опубликованы в 3 печатных работах в ведущих научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, в изданиях рекомендованных ВАК. Личный вклад автора в диссертационную работу является определяющим.

Аннотация соответствует содержанию диссертации полностью отражает основные научные и практические результаты работы.

Практическая значимость работы связана с перспективами использования предлагаемых в диссертации подходов и квантовых когерентных структур. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, ИПТМ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, Российском квантовом центре г.Москва, МФТИ г.Долгопрудный.

Диссертационная работа «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых структур на основе кубитов-флаксоунов», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС". Ее автор, Москаленко Илья Николаевич заслуживает присуждения учёной степени

кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа обсуждена и одобрена на Ученом совете ИФТТ РАН

31 октября 2022 г. (протокол № 22 от 31 октября 2022 года).

Отзыв составил

Главный научный сотрудник,
Заведующий Лабораторией сверхпроводимости
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики твердого тела
имени Ю.А. Осипяна
Российской академии наук (ИФТТ РАН),
д. ф.-м. н., проф.



В.В. Рязанов