

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Москаленко Ильи Николаевича «Квантовая электродинамика сверхпроводниковых структур на основе кубитов-флаксоуиумов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния» и состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 30 ноября 2022 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 19.09.2022, протокол № 4.

Диссертация выполнена в лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС».

Научный руководитель – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС» Устинов Алексей Валентинович.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 4 от 19.09.2022) в составе:

1. Мухин Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ «МИСиС» – председатель комиссии;
2. Голубов Александр Авраамович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах Московского физико-технического института (МФТИ);
3. Печень Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий отделом, ведущий научный сотрудник отдела математических методов квантовых технологий МЦМУ МИАН;
4. Григорьев Павел Дмитриевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора электронных и оптических свойств твердых тел федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН;
5. Панкратов Андрей Леонидович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела терагерцовой спектроскопии Института физики микроструктур РАН.

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН).

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Предложены методы расчета характеристик и проектирования систем сверхпроводниковых кубитов на основе высокой индуктивности линейного массива джозефсоновских контактов, связанных с индивидуальным микроволновым резонатором, в копланарной архитектуре;

- Рассчитана и экспериментально продемонстрирована оригинальная схема сверхпроводникового кубита-флаксона 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;

- Предложен и реализован метод инициализации кубитов с частотой основного перехода ниже характерной температуры окружающей их среды ($\hbar\omega_{01}/2\pi < k_B T$) в их основном состоянии, основанный на использовании специально спроектированного управляемого канала рассеяния в виде емкостно связанной с кубитом микроволновой антенны

- Разработан и экспериментально продемонстрирован двухкубитный квантовый процессор с перестраиваемым элементом связи на основе емкостно связанных кубитов-флаксонов с частотой основного перехода менее 1 ГГц. Реализованы двухкубитные вентили fSIM и CZ и продемонстрирована работа алгоритма перекрестно-энтропийного тестирования, позволяющего выполнять оценки точности вентильных операций;

- Предложен метод детектирования положения одиночного флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов на основе высокой кинетической или джозефсоновской индуктивности, основанный на сдвиге частот плазменных мод джозефсоновских контактов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Разработанные методы расчета характеристик и проектирования систем сверхпроводниковых кубитов на основе высокой индуктивности линейного массива джозефсоновских контактов применимы и могут быть использованы для расчета более сложных многокубитных систем процессоров и симуляторов на их основе;

- Предложенный метод расчета системы емкостно связанных кубитов-флаксонов с перестраиваемой величиной взаимодействия подтвержден получением новых результатов представленных в диссертации. Данный метод эффективно адаптирует программный пакет QuTiP для составления полного гамильтониана многомодовой

системы и его дальнейшей численной диагонализации. Это значительно ускоряет расчет и позволяет определить область характерных параметров системы, которую можно реализовать в реальном устройстве.

- Метод детектирования положения одиночного флаксона в ячейках массива сверхпроводниковых кубитов позволяет рассматривать джозефсоновские передающие линии как многообещающую платформу для квантового моделирования защищенных симметрией топологических возбуждений.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- Использование гальванически встроенных линий контроля магнитного потока кубитов на основе высокой индуктивности позволило сократить число управляющих каналов до одного на каждый кубит, вместо двух каналов традиционно использованных ранее, где один канал связан индуктивно с кубитом и используется для подачи постоянного смещения на кубиты, а второй канал связан с кубитом емкостно и используется для реализации однокубитных вентилей. Это, в перспективе масштабирования, упрощает систему контроля и существенно снижает нагрузку на криостат;

- Перестраиваемый элемент связи позволил значительно уменьшить величину остаточного паразитного взаимодействия, а также величину перекрестных наводок, в сравнении с аналогичными системами взаимодействующих кубитов-флаксонов, но без промежуточного связующего элемента;

- Демонстрация двухкубитного процессора с перестраиваемым взаимодействием на базе кубитов-флаксонов открывает многообещающий подход к отказоустойчивым вычислениям с низкочастотными кубитами, которые могут стать конкурентоспособной альтернативой сверхпроводниковым процессорам на кубитах-трансмонах.

- Низкая частота кубитов-флаксонов 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;

- Экспериментальный протокол для детектирования положения магнитного флаксона впервые открывает возможность для исследования его квантовой динамики с

временным разрешением, что открывает альтернативный подход к созданию сверхпроводниковых симуляторов на основе джозефсоновских передающих линий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Полученные результаты базируются на методах и техниках эксперимента, широко используемых в международном научном обществе, а также хорошо согласуются с данными, опубликованными другими научными коллективами. Обработка полученных экспериментальных данных, а также численные расчеты выполнялись с использованием современных методов обработки и широко применяемых библиотек, таких как: matplotlib, numpy, scipy, qutip и др, а также программного пакета QuTip. Результаты проведенных расчетов и компьютерного моделирования качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными. Результаты и выводы, представленные в диссертации, получили положительную апробацию на международных и российских конференциях. Достоверность также подтверждается публикациями результатов в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад соискателя состоит в:

Автор выполнил анализ литературных данных, провел квантовомеханические и электродинамические расчеты разрабатываемых систем для моделирования их свойств и проектирования микросхем. Автор также принимал активное участие в сборке и подготовке программно-инструментальной базы для проведения измерений низкочастотных кубитов, составлял алгоритмы для автоматизации эксперимента, проводил измерения экспериментальных образцов, обработку и анализ полученных экспериментальных данных, подготовил публикации и доклады на конференциях.

Соискатель представил 3 опубликованные работы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science, Scopus, одно из которых также входит в перечень, рекомендованный ВАК.

Пункт 2.6 Положения о порядке присуждения степени кандидата наук в НИТУ «МИСиС» соискателем учёной степени не нарушен.

Диссертация Москаленко Ильи Николаевича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в она посвящена исследованию сверхпроводниковых кубитов-флаксоoniumов, являющихся многообещающей альтернативой широко применяемым кубитам-трансмонам из-за их низкой частоты основного перехода и лучших когерентных свойств, в диссертации разработана оригинальная схема сверхпроводникового кубита на основе высокой джозефсоновской индуктивности, которая впервые позволила реализовать и продемонстрировать универсальный двухкубитный квантовый процессор с

перестраиваемым элементом связи на кубитах-флаксоиумах, и открыла новый путь к построению отказоустойчивых квантовых вычислений с низкочастотными кубитами.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Москаленко Илье Николаевичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



С. И. Мухин

30.11.2022