

На правах рукописи

Малеванная Елизавета Ильинична

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЭКРАНИРОВАНИЯ В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и
приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to the author, E. I. Malevanaya. The signature is stylized and cursive.

Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель:

Моисеев Константин Михайлович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Кошелец Валерий Павлович,
доктор физико-математических наук,
Институт радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова РАН,
главный научный сотрудник

Дорофеев Александр Викторович,
доктор физико-математических наук,
Институт теоретической и прикладной
электродинамики РАН,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
доктор технических наук, доцент



С. А. Мешков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В настоящее время по всему миру ведется активная разработка вычислительных устройств на новых физических принципах. В основе всех таких вычислителей лежит система с двумя энергетическими уровнями, т. н. кубит. Сверхпроводниковые структуры с джозефсоновскими переходами являются одной из наиболее перспективных реализаций кубита по двум причинам: высокая точность предсказаний их свойств при моделировании и технологичность реализации. Такие структуры формируются на кремниевой подложке методами стандартной планарной технологии.

Финальной стадией технологического процесса производства сверхпроводниковых структур является измерение их основных параметров для оценки качества готового устройства. Такие измерения проводятся при криогенных температурах около 0,01 K, которые достигаются в специальном оборудовании – криостате растворения, внутри которого располагается образец. Для обеспечения технологической операции измерения характеристик сверхпроводниковых структур внутри оборудования необходимо использовать многослойные системы экранирования вокруг держателя со сверхпроводниковой структурой.

Системы экранирования уменьшают воздействие внешних факторов (инфракрасного (ИК) излучения и электромагнитного поля), к которым крайне чувствительны сверхпроводниковые структуры и которые приводят к разрушению когерентного состояния системы и, как следствие, потере информации о нем. Одним из наиболее значимых результатов внешних воздействий является образование в сверхпроводниковой структуре квазичастиц, которые представляют собой возбуждение конденсата куперовских пар электронов (носителей тока в сверхпроводнике).

Ведущими научными группами, занимающимися изготовлением сверхпроводниковых структур, в частности, с джозефсоновскими переходами, и измерением их параметров, являются организации и университеты в США (Google AI Quantum, IBM, Массачусетский технологический институт, Йельский университет и др.), Канаде (D-Wave Systems, Университет Ватерлоо), Европе (Технологический институт Карлсруэ, Технологический университет Делфта, Технический университет Чалмерса и др.), а также в Японии и Китае. Все рассмотренные группы используют системы экранирования собственной разработки. Анализ литературы показывает, что несмотря на использование общих подходов в экранировании (поглощающие ИК излучение материалы, экраны из мю-металла и сверхпроводника и др.), имеется ряд открытых вопросов, касающихся эффективного применения систем экранирования: отсутствие единого и научно-обоснованного подхода к выбору конфигурации и конструкции экранов и материалов для них, отсутствие методики оценки эффективности систем экранирования. Все это говорит о том, что обеспечение среды с минимальным уровнем внешних шумов внутри технологического оборудования является трудоемкой и не до конца решенной задачей.

Таким образом, создание как самих систем экранирования, так и методики оценки их эффективности является актуальной задачей для реализации технологической операции измерения параметров сверхпроводниковых структур.

Поэтому **целью работы** является научно-обоснованный выбор материалов и конфигурации систем экранирования сверхпроводниковых структур и разработка методики оценки эффективности таких систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

1. провести анализ используемых методов, материалов и конструкций экранирования сверхпроводниковых структур для защиты от внешнего электромагнитного поля и ИК излучения, и на его основе определить требования к системе экранирования и ее отдельным элементам;

2. провести математическое моделирование и теоретический расчет для определения набора материалов и конструкций, соответствующих выявленным требованиям к экранированию, и сформулировать рекомендации по проектированию системы экранов, обладающей улучшенной эффективностью защиты от ИК излучения и электромагнитного поля;

3. проанализировать способы количественной оценки эффективности систем экранирования и разработать методику, позволяющую проводить сравнение систем экранов между собой;

4. провести экспериментальную оценку эффективности разработанных систем экранирования с помощью созданной методики и определить конфигурацию для заданных условий работы.

В ходе выполнения работы определены положения **научной новизны**:

1. На основе теории теплопередачи излучением и законов магнитостатики определены зависимости между конструктивными элементами систем экранирования и эффективностью подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля.

2. С помощью установленных зависимостей определены и обоснованы требования к конструкции и конфигурации систем экранирования, что позволяет проектировать систему экранов в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.

3. Научно обосновано применение способа количественной оценки эффективности систем экранирования, где в качестве критериев используется три параметра, измеряемых в сверхпроводниковой структуре, чувствительной к зарядовым шумам: время жизни зарядовой четности, нормализованная плотность квазичастиц и эффективная температура сверхпроводниковой структуры.

Практическая значимость:

1. Сформулированы рекомендации по проектированию систем экранирования в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.

2. Спроектирован и изготовлен опытный образец системы экранирования, состоящий из держателя с поглощающим покрытием, внутреннего сверхпроводящего экрана с герметичной крышкой и отверстиями под ввод СВЧ

кабелей и внешнего мю-металлического экрана, обеспечивающий время жизни зарядовой четности и нормализованную плотность квазичастиц лучше на 2,5 порядка и эффективную температуру сверхпроводниковой структуры ниже на ~15% по сравнению с неэкранированным образцом.

3. Разработана методика оценки эффективности систем экранирования, основанная на измерении переключений зарядовой четности, позволяющая определить комплексное влияние системы экранирования на сверхпроводниковую структуру.

Результаты внедрения

Разработанная методика оценки эффективности систем экранирования сверхпроводниковых структур и спроектированная система экранов внедрены в НОЦ «ФМНС» при выполнении НИОКР по разработке и исследованию сверхпроводниковых схем (шифр «Лиман»), проводимой МГТУ им. Н. Э. Баумана и ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», а также использованы в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Методы исследования

Поиск путей решения вопроса экранирования сверхпроводниковых структур основан на анализе тематических исследований в литературе. Расчет экранирования ИК излучения проведен с использованием теории теплопередачи излучением, а моделирование распределения индукции магнитного поля – с использованием законов магнитостатики. Посредством критериального анализа обоснован выбор способа реализации детектора для тестирования экранов, а благодаря матричной формулировке уравнений квантовой механики найдены собственные значения оператора полной энергии, в результате чего с помощью моделирования представлена имитация работы детектора, а также определены его электрические и геометрические параметры.

Достоверность полученных научных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждена результатами проведенных экспериментальных исследований, использованием общепринятых методик измерения характеристик сверхпроводниковых структур (проведение одно- и двухтоновой спектроскопии, измерение осцилляций Рамзи и др.), непротиворечивостью полученных результатов мировым достижениям, а также обусловлена использованием поверенных средств измерений в лаборатории НОЦ «ФМНС» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установленные в результате моделирования зависимости позволяют количественно определить влияние конструктивных элементов систем экранирования на эффективность подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля.

2. Сформулированные рекомендации по проектированию систем экранирования сверхпроводниковых структур позволяют разработать систему экранирования с улучшенной эффективностью в технологическом оборудовании для измерения параметров сверхпроводниковых структур.

3. Разработанная методика оценки эффективности систем экранирования, основанная на измерении переключений зарядовой четности, позволяет комплексно определить степень защиты от внешнего ИК излучения и магнитного поля с помощью систем экранирования: оценить изменение количества квазичастиц и частоты их туннелирования, а также величину эффективной температуры сверхпроводниковой структуры.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были представлены на конференциях: 25-ой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Судак, 2018; 5-ой международной конференции по квантовым технологиям «ICQT-2019». Москва, 2019; конференции «APS March Meeting 2020». Денвер, 2020; 3-ей международной школе по квантовым технологиям «QTS'20». Сочи, 2020; XV и XVI научно-технических конференциях «ВНИИА-2021» и «ВНИИА-2022». Москва, 2021 и 2022; а также на научных семинарах кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва, 2019-2022.

Публикации

По результатам и основному содержанию диссертации опубликовано 11 научных работ в рецензируемых журналах и трудах конференций, из них 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 6 – в научно-технических журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, общим объемом 1,51 п.л.

Личный вклад

Автором проведен анализ систем экранирования, используемых для защиты сверхпроводниковых структур от внешних воздействий, и определены требования к материалам, применяемым для изготовления экранов. Составлена система экранов, являющаяся вариантом наиболее часто применяемого экранирования. Проведены теоретический расчет и численное моделирование различных конфигураций систем экранирования для защиты от ИК излучения и постоянного магнитного поля, в результате чего сформулированы рекомендации по проектированию экранирования и сконфигурирована система экранов, обеспечивающая теоретически улучшенную защиту образца от внешних воздействий по сравнению с вариантом наиболее часто применяемой системы экранов. Проанализированы способы создания детектора на основе сверхпроводниковой структуры, проведен расчет параметров кубита-детектора и промоделирована его работа. Разработана топология устройства. Разработана методика оценки эффективности систем экранирования по трем параметрам. Автор принимал непосредственное участие в характеристизации кубита-детектора и экспериментальной оценке эффективности систем экранирования.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, общих выводов и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 181 странице, содержащей 78 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 274 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены ее цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен литературный анализ решений по защите сверхпроводниковых структур от внешних воздействий во время проведения технологической операции по измерению параметров сверхпроводниковых структур на финальном этапе их производства. Рассмотрены общие принципы работы сверхпроводниковых структур на примере сверхпроводниковых кубитов и источники их декогеренции – процесса потери квантовой системой информации о своем состоянии. Рассмотрены наиболее распространенные способы оценки эффективности систем экранирования.

Одним из основных источников декогеренции в сверхпроводниковых структурах являются квазичастицы – возбуждения конденсата куперовских пар в сверхпроводнике. Для снижения плотности квазичастиц используются ловушки различного типа, управление устройством, позволяющее снизить интенсивность возбуждения квазичастиц, а также системы экранирования сверхпроводниковых структур и фильтрация входящих СВЧ сигналов внутри технологического оборудования для измерения параметров сверхпроводниковых структур – криостате растворения.

Ведущими научными группами в области разработки и исследования сверхпроводниковых структур применяются различные материалы и конструкции экранов. Схожими являются тенденции к использованию сверхпроводящих материалов и металлов с высокой относительной магнитной проницаемостью (мю-металлов) от магнитного поля, а также поглощающих покрытий для защиты от ИК излучения. При этом остается ряд открытых вопросов, касающихся конструкции экранов, их расположения друг относительно друга и их эффективности экранирования, что приводит к отсутствию единых рекомендаций по экранированию и критериев оценки его эффективности.

Эффективность экранирования от конкретного вида деструктивного воздействия определяется путем измерения параметра, зависящего от этого воздействия, при наличии экранов и при их отсутствии. Для этого используются различные детекторы, предназначенные для регистрации определенного рода излучения: ИК фотонов, электрической и магнитной составляющей поля. Однако предпочтительнее для оценки эффективности экранов использовать свойства самих сверхпроводниковых структур и работать только с одним устройством: если сверхпроводниковую структуру сделать, наоборот, более чувствительной к внешним воздействиям, то по ее работе можно судить об эффективности экранирования.

Таким образом, в Главе 1 рассмотрены подходы к экранированию сверхпроводниковых структур для защиты от ИК излучения и электромагнитного поля. Выявлены общие закономерности и отличия в системах экранирования ведущих научных групп, а также рассмотрены способы оценки эффективности

систем экранирования с помощью детекторов ИК излучения и электрической и магнитной составляющих поля.

Глава 2 посвящена численному моделированию и теоретическому расчету различных конфигураций систем экранирования, в результате чего выявлены взаимосвязи между конструктивными элементами систем экранов и эффективностью подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля. Сформулированы рекомендации по проектированию систем экранирования с улучшенной эффективностью. В конце главы представлены разработанные системы экранирования для экспериментальной оценки их эффективности.

Источниками ИК излучения в криостате растворения являются верхние ступени, тепло от которых распространяется по сигнальным кабелям, пассивные элементы измерительной схемы, а также сама сверхпроводниковая структура, которая охлаждается, в основном, посредством потери тепловой энергии через излучение. На основе рекомендаций из литературы экран для защиты от ИК излучения должен быть выполнен из гладкого полированного металла снаружи и обладать хорошо поглощающей поверхностью внутри. При этом экран должен иметь качественный тепловой контакт с нижней плитой криостата для обеспечения направления потока теплового излучения от чипа к экрану, а не наоборот. Также для более эффективного поглощения ИК излучения с длиной волны от 9,6 мкм до 1,0 мм покрытие должно быть оптически шероховатым, т.е. иметь среднеквадратичное значение шероховатости поверхности 1,0 мм и выше.

Теоретическую оценку эффективности различных конфигураций систем экранирования можно провести по теории теплопередачи излучением. Для таких расчетов необходимо знать коэффициенты поглощения всех материалов, входящих в систему «образец-экраны-криостат». Для дальнейшего практического использования необходимо определить коэффициенты поглощения используемых материалов экспериментально. Для определения наилучшего поглощающего материала на основе эпоксидных смол (Stycast, Eccosorb CR-110 или CRS-124) с дополнительными частицами на их поверхности (зерна SiC размером 0,5 или 1,0 мм, порошок активированного угля) использован метод двойного измерения температур. Образцы нагреваются до известного значения температуры, а затем температура измеряется двумя методами – контактным с помощью термопары и бесконтактным посредством тепловизора с некоторым установленным значением коэффициента поглощения. Из разницы двух показаний высчитывается истинный коэффициент поглощения поверхности. По результатам исследования 30 образцов с различными материалами подложек (медь шероховатая или полированная, алюминий) и поглощающих покрытий определен материал, обладающий наибольшим коэффициентом поглощения, равным 0,952, и состоящий из смолы Stycast, зерен SiC размером 0,5 мм, еще одного слоя смолы Stycast и порошка активированного угля.

Затем проведен теоретический расчет и численное моделирование потока теплового излучения в системе «образец-экраны-криостат» для определения наиболее эффективной конфигурации системы экранирования для защиты от ИК

излучения. И теоретический расчет, и численное моделирование основаны на теории теплопередачи излучением, а наиболее эффективное экранирование определяется по минимально достижимой температуре образца со сверхпроводниковой структурой. Теоретический расчет проведен методом полных потоков излучения, в результате чего решена обратная задача: по известному потоку теплового излучения $Q_{1,2}$, равному $3,45 \cdot 10^{-9}$ Вт, найдена температура образца со сверхпроводниковой структурой при разных конфигурациях экранов. При этом в рамках расчета было рассмотрено две задачи, для которых использованы соответствующие формулы:

1. сама сверхпроводниковая структура является источником излучения, это, по сути имитация ее охлаждения внутри криостата растворения:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{Q_{1,2}}{c_0(\varepsilon_{1,2(в)}F_{1(в)} + \varepsilon_{1,2(н)}F_{1(н)})}} + T_2^4, \quad (1)$$

где T_1 – температура образца со сверхпроводниковой структурой; $Q_{1,2}$ – результирующий поток теплового излучения; c_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{1,2(в)}$ – приведенный коэффициент поглощения системы с учетом верхней поверхности образца; $F_{1(в)}$ – площадь верхней поверхности образца; $\varepsilon_{1,2(н)}$ – приведенный коэффициент поглощения системы с учетом нижней поверхности образца; $F_{1(н)}$ – площадь нижней поверхности образца; T_2 – температура ближайшей к образцу поверхности.

2. наличие внешнего относительно держателя источника излучения типа фильтра или коаксиального разъема:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{Q_{(1,2)э}}{c_0(\varepsilon_{(1,2)э(в)}F_{1(в)} + \varepsilon_{(1,2)э(н)}F_{1(н)})}} + T_2^4, \quad (2)$$

где $Q_{(1,2)э}$ – результирующий поток теплового излучения при наличии экранов; $\varepsilon_{(1,2)э(в)}$ – приведенный коэффициент поглощения системы с учетом верхней поверхности образца и наличия экранов; $\varepsilon_{(1,2)э(н)}$ – приведенный коэффициент поглощения системы с учетом нижней поверхности образца и наличия экранов; T_2 – температура нижней ступени криостата.

Численное моделирование показало расхождение величиной в ~6% по сравнению с теоретическим расчетом, что говорит о хорошей согласованности результатов, полученных двумя способами. Поэтому для дальнейшего поиска наилучшего решения по конструктивному исполнению держателя образца использовано именно численное моделирование.

Результаты расчетов показали, что наиболее значимой с точки зрения более эффективного охлаждения образца со сверхпроводниковой структурой является ближайшая к нему поверхность – крышка держателя образца. Нанесение на крышку держателя поглощающего покрытия позволяет снизить температуру образца до 25% по сравнению с крышкой без поглощающего покрытия. При этом экранирования за счет поглощающей поверхности держателя достаточно, и

дополнительные экраны вокруг являются избыточными, т.к. не увеличивают эффективности защиты от ИК излучения.

Моделирование разного конструктивного исполнения крышки показало, что крышка держателя образца должна быть выполнена в виде индивидуального экранирования над чипом, а зазор между дном и крышкой не должен превышать 0,1 мм, что позволяет снизить температуру образца со сверхпроводниковой структурой примерно в 2 раза по сравнению с крышкой, закрывающей чип, плату и разъемы.

Для подавления внешнего электромагнитного поля используется несколько подходов: для постоянного магнитного поля применяются материалы с высокой относительной магнитной проницаемостью, для постоянного электрического поля – проводники с хорошим заземлением, а для переменного электромагнитного поля – сверхпроводники или материалы с малой глубиной проникновения поля. Для определения наилучшей конструкции экранов для защиты от постоянного магнитного поля проведен магнитостатический расчет методом конечных элементов распределения индукции магнитного поля Земли в цилиндрических экранах с разным исполнением верхней части экрана под ввод СВЧ-кабелей и расположением экранов друг относительно друга.

Моделирование разного конструктивного исполнения крышки и отверстий в ней под ввод СВЧ-кабелей показало, что крышка не должна иметь зазоров с основной частью экрана, а отверстия в крышке должны быть выполнены в виде волноводов длиной не менее 10 мм, что позволяет улучшить равномерность индукции магнитного поля внутри от 2 до 3 порядков.

В некоторых работах по экранированию встречается размещение ИК фильтров внутри экранирования. Поскольку такие фильтры часто в качестве наполнителя содержат порошок ферромагнетика, необходимо выяснить, влияют ли они на уровень магнитной индукции в экранируемом пространстве. Моделирование показало, что нахождение фильтра на основе порошка ферромагнетика не приводит к критическому увеличению магнитной индукции (выше $6,9 \cdot 10^{-5}$ Тл) внутри экранов: в месте расположения фильтра уровень магнитной индукции находится на уровне $\sim 8 \cdot 10^{-7}$ Тл в мю-металле и $\sim 7 \cdot 10^{-8}$ Тл в сверхпроводнике.

В результате моделирования нескольких двухслойных конфигураций систем экранирования из сверхпроводника и мю-металла определены наборы экранов, обладающие наибольшей эффективностью защиты от постоянного магнитного поля (Таблица 1). Эффективность в данном случае определяется отношением магнитной индукции при отсутствии экрана ($B_0 = 50$ мкТл) и при его наличии (B):

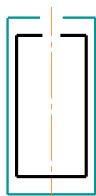
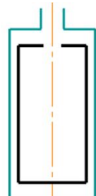

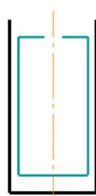
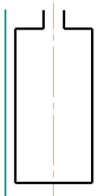
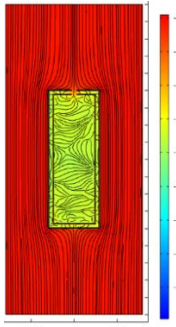
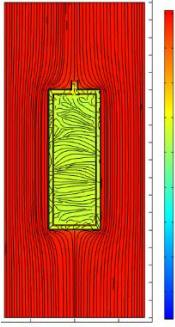
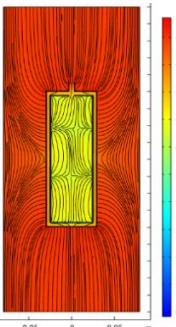
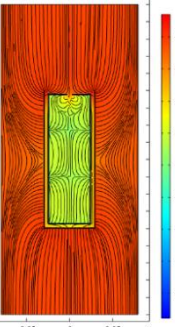
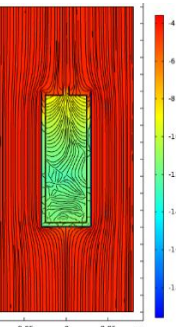
$$\mathcal{E} = B_0/B. \quad (3)$$

Среди рассмотренных в моделировании конструкций наиболее технологичной с точки зрения изготовления, и в то же время, эффективной, является система, состоящая из внутреннего сверхпроводящего экрана с герметичной крышкой и отверстиями под ввод СВЧ кабелей и внешнего мю-металлического экрана в виде открытого цилиндра. Такое экранирование

обеспечивает уровень индукции магнитного поля внутри на среднем уровне $1,4 \cdot 10^{-10}$ Тл, это соответствует эффективности экранирования ~ 55 дБ и на порядок лучше приводимых в литературе значений.

Таблица 1.

Наилучшие результаты моделирования распределения индукции магнитного поля в некоторых конфигурациях экранов

№ п/п	1	2	3	4	5
Сечение					
Распределение поля					
Среднее значение индукции магнитного поля, Тл	$8,96 \cdot 10^{-12}$	$1,31 \cdot 10^{-11}$	$5,86 \cdot 10^{-11}$	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$1,96 \cdot 10^{-10}$
Эффективность экранирования, дБ	67,46	65,82	59,31	55,53	54,06

В конце главы приведены разработанные системы экранирования для экспериментальной оценки их эффективности. На основе данных из литературы по применяемым системам экранирования создана система из трех экранов – «Экраны 1» (Рисунок 1, а), являющаяся вариантом наиболее часто применяемого экранирования. Затем с учетом сформулированных рекомендаций по проектированию систем экранирования разработана система – «Экраны 2» (Рисунок 1, б), которая потенциально обладает улучшенной эффективностью экранирования. Однако из-за особенностей оснастки для крепления элементов измерительной схемы внутри криостата крепление системы экранов реализовано через медную деталь оснастки, прикрепленную к алюминиевой крышке экранов («Экраны 2 (Al)») (Рисунок 1, в). При этом система «Экраны 2 (Al)» состоит на 30% из меньшего количества деталей, чем система «Экраны 1», что делает ее более технологичной. Обе системы экранирования изготовлены для дальнейшего проведения экспериментального сравнения их эффективности.

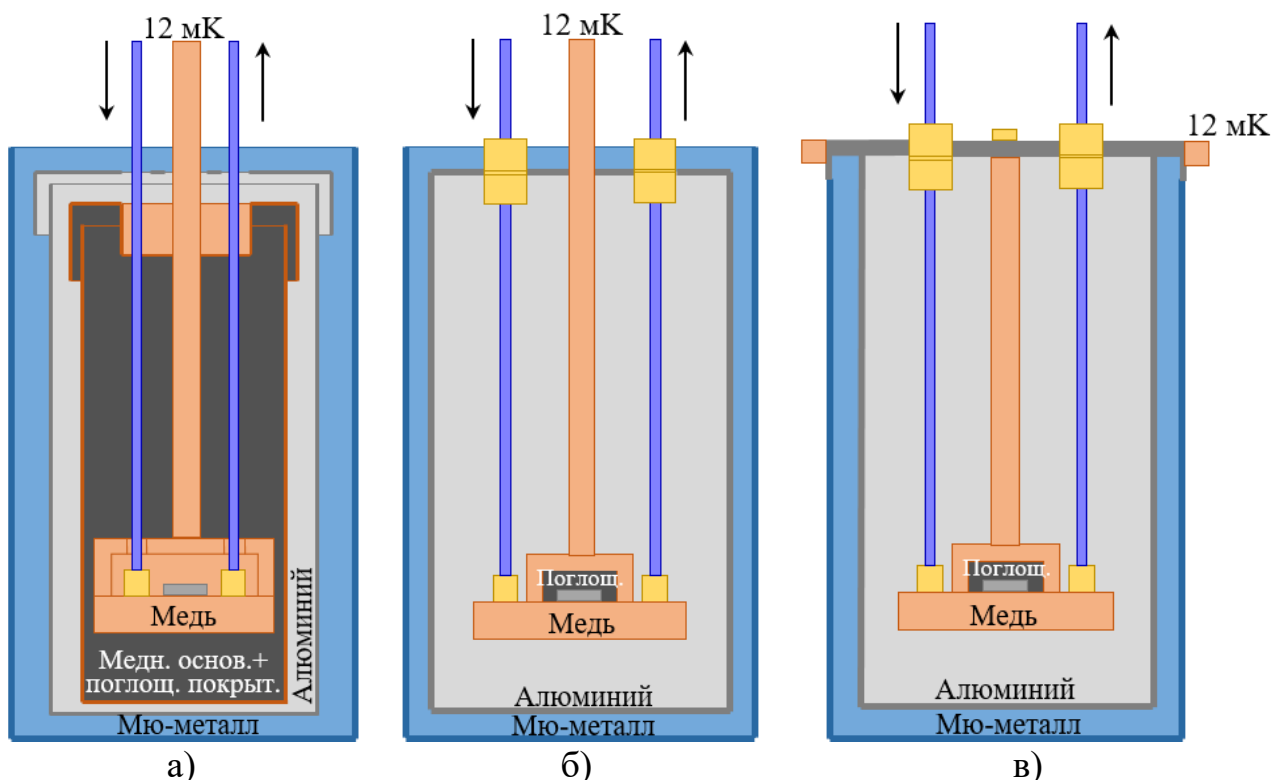


Рисунок 1. Системы экранирования для тестирования: а) созданная на основе литературного обзора («Экраны 1»); б) спроектированная по результатам расчетов («Экраны 2»); в) изготовленная с учетом особенностей крепления внутри криостата («Экраны 2 (Al)»)

Таким образом в Главе 2 на основе теории теплопередачи излучением и законов магнитостатики выявлены зависимости между конструктивными элементами систем экранирования и эффективностью подавления внешнего ИК излучения и магнитного поля, в результате чего сформулированы рекомендации по проектированию систем экранирования для измерения характеристик сверхпроводниковых структур. Спроектированы и изготовлены две системы экранирования для экспериментальной оценки их эффективности экранирования.

Глава 3 посвящена разработке методики тестирования систем экранирования с помощью кубита, чувствительного к зарядовым шумам. В начале главы рассмотрено несколько способов реализации детектора на основе сверхпроводниковой структуры (измерение времени релаксации, определение частоты и амплитуды внешнего электромагнитного поля по Штарковскому сдвигу, измерение зарядовой четности) и проведено их сравнение.

В результате анализа сделан выбор в пользу способа, основанного на регистрации переключений зарядовой четности в кубите, чувствительном к зарядовым шумам. В таком кубите-детекторе возможно отслеживать непосредственное туннелирование квазичастиц в сверхпроводниковой структуре. Чем меньше квазичастиц туннелирует, тем меньше внешних воздействий поступает на кубит, и, как следствие, тем лучше защищают экраны. Регистрация туннелирования квазичастиц позволяет сделать оценку эффективности экранов более точной и быстрой по сравнению с другими способами, при этом не требует

большого количества дополнительных расчетов и приспособлений для проведения измерений.

В предлагаемой методике эффективность конкретной системы экранирования оценивается по степени уменьшения нормализованной плотности квазичастиц x_{qp} , увеличения времени жизни зарядовой четности T_P и снижения эффективной температуры образца со сверхпроводниковой структурой T_{eff} относительно неэкранированного образца. Первый параметр позволяет оценить, сколько всего квазичастиц сгенерировано в сверхпроводниковой структуре, а второй – как часто квазичастицы туннелируют через ее джозефсоновский переход. Определение эффективной температуры сверхпроводниковой структуры T_{eff} позволяет оценить эффективность ИК экранирования и сравнить полученные значения с результатами теоретического расчета. Нахождение этих трех параметров позволяет оценить комплексное влияние системы экранирования на работу сверхпроводниковой структуры.

Методика оценки эффективности систем экранирования состоит из следующих основных шагов:

1. Характеризация кубита-детектора: нахождение частот резонаторов – f_r , определение средней частоты кубита – f_{01cped} и разброса частоты от наведенного заряда $n_g - \delta f_{01}(n_g)_{max}$, нахождение времени релаксации T_1 и когерентности T_2 .

2. Регистрация переключений зарядовой четности P от времени.

– Проведение интерферометрии Рамзи при подаче сигнала на средней частоте кубита f_{01cped} . Определение отстройки кубита от средней частоты в данный момент времени $\delta f_{01}(n_g)$.

– Косвенное измерение зарядовой четности P через отображение на состояние кубита: применение двух последовательных $\pi/2$ -импульсов вокруг ортогональных осей (X и Y) с задержкой между ними $t = 1/4\delta f_{01}(n_g)$. Эксперимент повторяется каждые $\Delta t_{exp} = 10$ мкс в течение 600 мс.

– Вычисление зарядовой четности для каждого измерения по формуле $P = (2M_1 - 1) \times (2M_2 - 1)$.

– Построение графика переключения зарядовой четности от времени.

– Построение графика спектральной плотности мощности S_P флуктуаций зарядовой четности P , а затем его аппроксимация лоренцианом случайного телеграфного сигнала:

$$S_P[f] = \frac{4F^2/T_P}{(2/T_P)^2 + (2\pi f)^2} + (1 - F^2)\Delta t_{exp}. \quad (4)$$

– Вычисление из построенной аппроксимации времени жизни зарядовой четности T_P и точности отображения \mathcal{F} .

3. Расчет x_{qp} по формуле:

$$x_{qp} = \frac{1}{T_P} \sqrt{\frac{\pi^2 \hbar}{2\omega_q \Delta}}, \quad (5)$$

где \hbar – приведенная постоянная Планка, $\omega_q = 2\pi f_{01}$ – частота перехода кубита между состояниями $|0\rangle$ и $|1\rangle$, Δ – величина энергетической щели сверхпроводника.

Это значение, полученное при базовой температуре криостата, дает значение нормализованной плотности неравновесных квазичастиц x_{qp}^{ne} , которое понадобится при расчете эффективной температуры.

4. Проведение нагрева криостата, и при нескольких значениях температуры повтор измерений, описанных в п. 2 и 3. Как только значение T_P начнет снижаться, нагрев прекращается, и далее используется последнее измеренное значение T_P .

5. Вычисление эффективной температуры кубита T_{eff} с использованием формул:

$$x_{qp} = x_{qp}^{th} + x_{qp}^{ne}, \quad (6)$$

$$x_{qp}^{th} = \sqrt{\frac{2\pi k_B T_{eff}}{\Delta}} e^{-\frac{\Delta}{k_B T_{eff}}}. \quad (7)$$

6. Смена экранирования, повтор измерений, описанных в п. со 2 по 5.

7. Сравнение полученных результатов и определение наиболее эффективной системы экранирования.

Условием для реализации описанной методики является разработка детектора на основе сверхпроводниковой структуры (кубита), чувствительной к зарядовым шумам. Первый этап проектирования кубита заключается в расчете его электрических характеристик (Рисунок 2, а), удовлетворяющих чувствительному к наведенному заряду n_g режиму работы (Рисунок 2, б), определяющее условие которого – отношение джозефсоновской энергии к зарядовой $E_J/E_C \sim 20$.

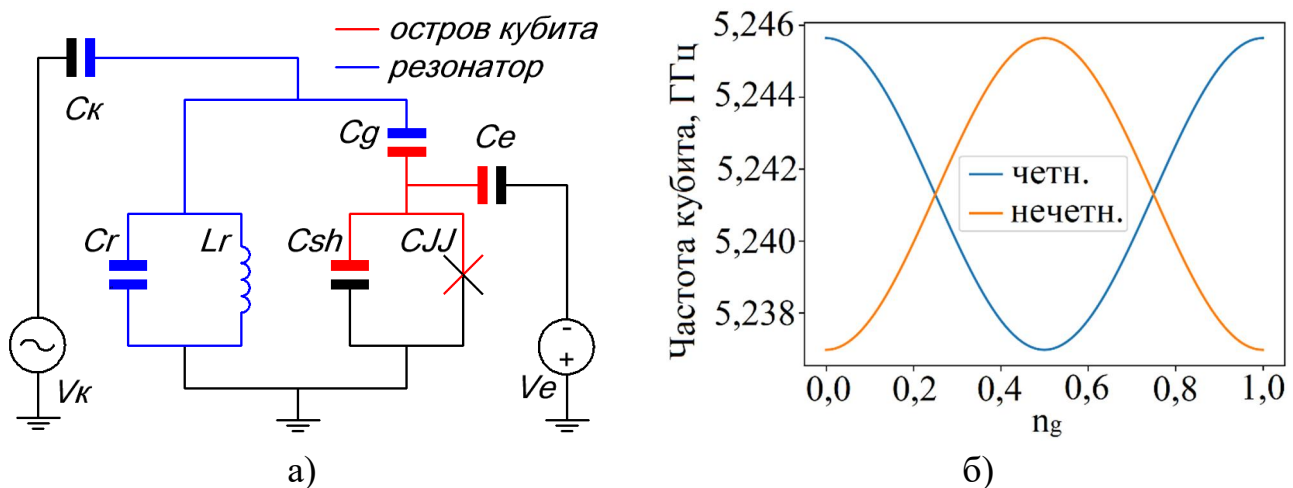


Рисунок 2. Проектирование кубита-детектора: а) электрическая схема устройства; б) моделирование работы кубита

На втором этапе по полученным электрическим характеристикам рассчитываются геометрические размеры элементов устройства (Рисунок 3) и разрабатывается топология детектора.

Процесс изготовления устройства является классическим для сверхпроводниковых структур с джозефсоновскими переходами и состоит из стандартных операций планарной технологии. Образец кубита-детектора изготовлен и подготовлен к проведению криоизмерений.

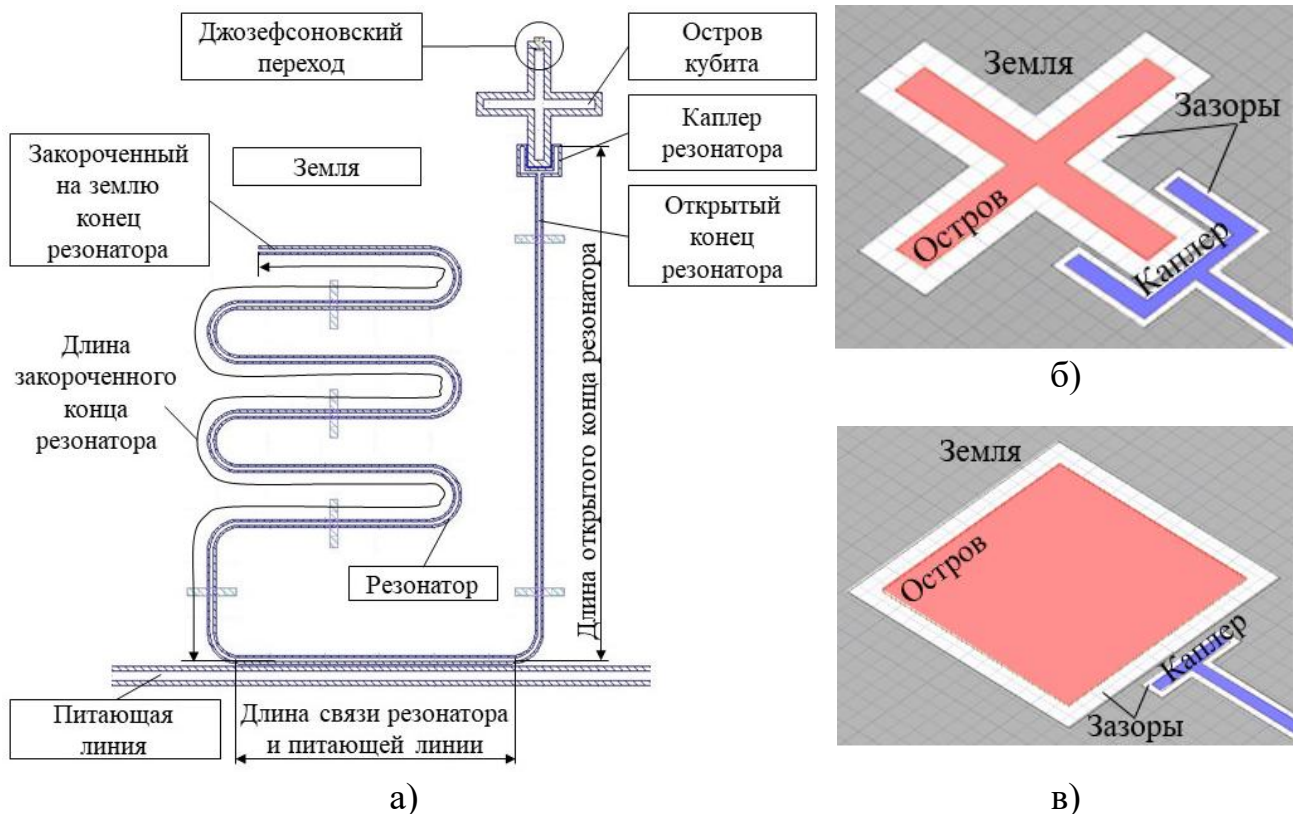


Рисунок 3. Элементы топологии кубита: а) резонатор; б) остров в виде креста; в) остров в виде квадрата

Таким образом, в Главе 3 обоснован способ оценки эффективности систем экранирования, основанный на измерении переключений зарядовой четности в сверхпроводниковой структуре, и описана методика сравнения систем экранов. Спроектировано и изготовлено устройство для реализации предложенной методики.

Глава 4 посвящена апробации методики оценки эффективности систем экранирования на основе кубита-детектора и экспериментальной оценке эффективности спроектированных и изготовленных ранее систем экранов.

Апробация методики оценки эффективности экранирования начинается с характеристики кубита-детектора и отработки экспериментов по измерению осцилляций Рамзи во времени. Характеризация кубита показала, что детектор работает в режиме, чувствительном к зарядовым шумам, следовательно, с помощью него возможно реализовать предложенную методику. Основным результатом измерений кубита – регистрация переключений зарядовой четности и вычисление времени ее жизни. Затем проводится вычисление x_{qp} и T_{eff} .

С помощью кубита-детектора протестированы две системы экранирования: разработанная по сформулированным рекомендациям («Экраны 2 (А1)») и являющаяся вариантом наиболее часто применяемого экранирования («Экраны 1»). В результате измерений (Таблица 2) определено, что экранирование увеличивает время жизни зарядовой четности практически на 2,5 порядка (Рисунок 4) и позволяет снизить эффективную температуру сверхпроводниковой структуры на ~15% по сравнению с неэкранированным образцом.

Таблица 2.

Результаты измерения критериев оценки эффективности в кубите-детекторе при разных системах экранирования

№ п/п	Параметр	Без экранов	Экраны 1	Экраны 2 (Al)
1	Время жизни зарядовой четности T_P , мкс	195±21	85189±52061	43639±37645
2	Нормализованная плотность квазичастиц x_{qp}	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$2,83 \cdot 10^{-10}$	$8,38 \cdot 10^{-10}$
3	Эффективная температура кубита T_{eff} , К	0,124	0,102	0,107

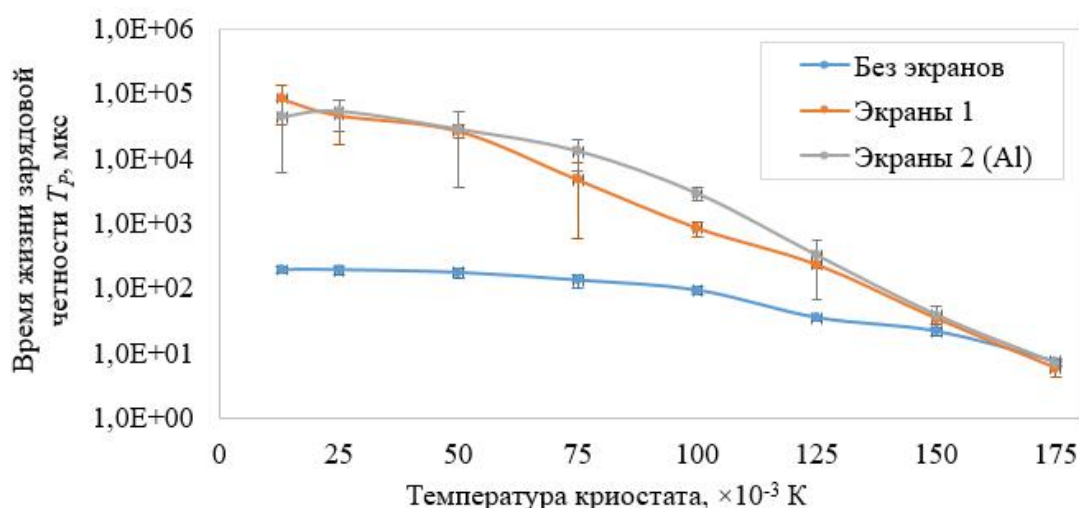


Рисунок 4. Результаты T_P для двух систем экранирования по сравнению с неэкранированным образцом в зависимости от температуры нижней ступени криостата

Однако из-за конструктивных особенностей крепления системы «Экраны 2 (Al)» через алюминиевую крышку в используемом криостате Blue Fors LD-400 время достижения минимальных температур больше, чем в системе «Экраны 1». По этой причине система «Экраны 2 (Al)» показывает результаты, немного уступающие варианту наиболее часто применяемого экранирования – «Экранам 1», но тем не менее удовлетворяющие требованиям к высокой степени защиты сверхпроводниковой структуры от внешних воздействий. При этом система «Экраны 2 (Al)» обладает более технологичной конструкцией по сравнению с системой «Экраны 1», что делает ее конструкцию более предпочтительной для масштабирования. Также проведенное экспериментальное исследование показывает, что важно применять дополнительные способы увеличения контакта с самой холодной ступенью криостата, поэтому это необходимо учитывать в следующих вариантах экранирования.

В конце главы показано, что поскольку на динамику квазичастиц в сверхпроводниковых структурах оказывают влияние и другие элементы измерительной схемы, в частности, ИК фильтры и аттенюаторы, то возможно использование разработанной методики оценки эффективности систем

экранирования через регистрацию туннелирования квазичастиц для тестирования этих элементов.

Таким образом, в Главе 4 продемонстрирована апробация методики оценки эффективности систем экранирования, и представлена экспериментальная оценка изготовленных систем экранов.

В Заключение анализируются полученные результаты и приводятся общие выводы по работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании литературного обзора установлено, что для защиты сверхпроводниковых структур от внешних воздействий (электромагнитных полей и ИК излучения) используют многоступенчатые системы экранирования, которые различны по конфигурациям, конструктивному исполнению и применяемым материалам, при этом отсутствует расчетно-теоретическое обоснование по выбору материалов для экранов и их конструктивному исполнению, что не позволяет однозначным образом выбрать наиболее эффективную систему экранирования для заданного применения.

2. Для оценки эффективности экранирования рекомендуется использовать свойства самих сверхпроводниковых структур, специально настроенных для восприятия внешних возмущений, поскольку потенциально они окажутся более точными в качестве детектора и более удобными с точки зрения проектирования, изготовления и эксплуатации, чем набор детекторов ИК излучения, электрической и магнитной составляющих поля.

3. На основе теории теплопередачи излучением и с помощью уравнений магнитостатики установлены зависимости, позволяющие численно определить влияние конструктивного исполнения систем экранирования на эффективность защиты сверхпроводниковых структур от внешнего ИК излучения и магнитного поля Земли и разработать следующие рекомендации по проектированию систем экранирования:

- наиболее значимой с точки зрения более эффективного охлаждения образца является самая близкая к нему поверхность – крышка держателя образца, поэтому для достижения более низкой температуры образца вплоть до 25% рекомендуется эту поверхность делать поглощающей;

- как для более эффективного охлаждения образца, так и для защиты от внешних источников излучения экранирования за счет держателя достаточно, поскольку дополнительные экраны вокруг держателя не повышают эффективность, т.е. являются избыточными;

- крышку держателя следует изготавливать не в виде общей крышки, покрывающей образец, плату и разъемы, а в виде индивидуального поглощающего экрана, что позволяет снизить температуру образца со сверхпроводниковой структурой примерно в 2 раза;

- для достижения минимальных температур сверхпроводниковой структуры конструкция держателя должна быть реализована таким образом, чтобы зазор между дном и крышкой был не более 0,1 мм;

– крышка экрана от магнитного поля не должна иметь зазоров с основной частью экрана, а отверстия в крышке должны быть выполнены в виде волноводов длиной не менее 10 мм, что позволяет улучшить равномерность индукции магнитного поля внутри экранов от 2 до 3 порядков;

– наиболее рациональным с точки зрения технологичности конструкции и высокой эффективности вариантом двухслойного экранирования для защиты от магнитного поля является сверхпроводящий экран с герметичной крышкой и отверстиями под ввод кабелей внутри, мю-металлический цилиндр без крышки снаружи. Такое экранирование обеспечивает индукцию магнитного поля внутри на среднем уровне $1,4 \cdot 10^{-10}$ Тл, это соответствует эффективности экранирования ~ 55 дБ, что на порядок лучше приводимых в литературе данных.

4. Для оценки эффективности систем экранирования рекомендуется использовать сверхпроводниковую структуру, чувствительную к зарядовым шумам, поскольку в таком устройстве возможно регистрировать непосредственное туннелирование квазичастиц, что делает оценку экранов более точной и быстрой, а также с меньшим количеством дополнительных расчетов и приспособлений, чем через измерение времени релаксации или определение частоты и амплитуды внешнего электромагнитного поля через измерение Штарковского сдвига.

5. Для определения комплексного влияния системы экранирования на сверхпроводниковую структуру и сравнения систем между собой рекомендуется использовать методику оценки эффективности систем экранирования, основанную на измерении трех параметров (времени жизни зарядовой четности, нормализованной плотности квазичастиц и эффективной температуры кубита) в сверхпроводниковой структуре, чувствительной к зарядовым шумам, что достигается соблюдением условия, при котором отношение джозефсоновской энергии к зарядовой $E_J/E_C \sim 20$, которое необходимо обеспечить при проектировании детектора.

6. В результате экспериментальной оценки с помощью разработанной методики установлено, что спроектированная с использованием сформулированных рекомендаций система экранирования позволяет увеличить время жизни зарядовой четности и уменьшить нормализованную плотность квазичастиц на 2,5 порядка, а также снизить эффективную температуру сверхпроводниковой структуры на $\sim 15\%$ по сравнению с неэкранированным образцом, при этом содержит на 30% меньше деталей по сравнению с вариантом наиболее часто применяемой конфигурации экранирования.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Toward Highly Efficient Multimode Superconducting Quantum Memory / E. I. Malevannaya [et al.] // Phys. Rev. Applied. 2023. Vol. 19. P. 034011. (2,13 п.л./0,19 п.л.).
2. Broadband SNAIL parametric amplifier with microstrip impedance transformer / E. I. Malevannaya [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2022. Vol. 121. P. 232601. (0,81 п.л./0,07 п.л.).
3. Расчет и моделирование систем экранирования для защиты сверхпроводниковой электроники от ИК излучения / Е. И. Малеванная [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 517-529. (1,00 п.л./0,13 п.л.).
4. Электромагнитное экранирование сверхпроводниковых квантовых схем / Е. И. Малеванная [и др.] // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № 7-8. С. 446-458. (1,75 п.л./0,58 п.л.).
5. Cross Coupling of a Solid-State Qubit to an Input Signal due to Multiplexed Dispersive Readout / E. Malevannaya [et al.] // Phys. Rev. Applied. 2020. Vol. 14. P. 054059. (1,56 п.л./0,12 п.л.).
6. Light dressing of a diatomic superconducting artificial molecule / E. I. Malevannaya [et al.] // Phys. Rev. A. 2020. Vol. 102. P. 013707. (2,44 п.л./0,22 п.л.).
7. Low-decoherence planar superconducting Josephson qubits for quantum integrated circuits / E. I. Malevannaya [et al.] // 3rd International School on Quantum Technologies. (0,19 п.л./0,01 п.л.).
8. Improved coherence of superconductive qubits by Josephson junction optimization / E. I. Malevannaya [et al.] // 3rd International School on Quantum Technologies. (0,16 п.л./0,02 п.л.).
9. Over-100 μ s tunable planar transmons: epitaxial Josephson Junctions and design optimization / E. I. Malevannaya [et al.] // Bulletin of the American Physical Society. 2020. Vol. 65. No. 1 (<https://meetings.aps.org/Meeting/MAR20/Session/L08.14>). (0,13 п.л./0,01 п.л.).
10. Investigation of WSi and NbN superconducting single-photon detectors in mid-IR range / E. I. Malevannaya [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 781. P. 012011. (0,50 п.л./0,06 п.л.).
11. Superconducting detector of IR single-photons based on thin WSi films / E. I. Malevannaya [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 737. P. 012032. (0,91 п.л./0,10 п.л.).