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

На правах рукописи

Аверкин Александр Сергеевич

Ультракомпактные сверхпроводящие резонаторы для построения электромагнитных метаматериалов

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

Карпов Александр Владимирович,

доктор физико-математических наук, профессор

Консультант:

Устинов Алексей Валентинович,

доктор физико-математических наук, профессор

Москва - 2018

Содержание

Введение.....5

Глава 1. Обзор литературы.....16

1.1.Введение.....16

1.2. Электродинамика метаматериалов.....16

1.3. Сверхпроводящие микро-резонаторы и их применение.....20

1.4. Контакт Джозефсона. Сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы).....23

1.5. Сверхпроводящие метаматериалы.....26

1.6. Лазерный сканирующий микроскоп.....23

1.7. Описание работы программы High Frequency Structure Simulator (HFSS).....29

1.8. Постановка задачи.....32

Глава 2. Исследование сверхпроводящих спиральных элементов метаматериалов.....34

2.1. Введение.....34

2.2. Спиральный резонатор на спирали Архимеда.....36

2.2.1. Численный расчет спирали Архимеда.....36

2.2.2. Экспериментальная проверка численного расчета.....45

2.3. Кольцевой спиральный резонатор.....49

2.3.1. Численный расчет кольцевого спирального резонатора.....50

2.3.2. Экспериментальная проверка численного расчета.....55

2.4. Заключение.....57

Глава 3. Ультра-компактный магнитный мета-атом на основе двойной спирали.....59

3.1. Введение.....59

3.2. Сверхпроводящий резонатор на двойной спирали.....61

3.2.1. Численный расчет сверхпроводящего резонатора на двойной спирали.....61

3.2.2. Экспериментальная проверка численного расчета.....63

3.3. Сверхпроводящий резонатор на двойной спирали в интегральном исполнении.67

3.3.1. Численный расчет сверхпроводящего резонатора на двойной спирали в интегральном исполнении.....68

3.3.2. Экспериментальная проверка численного расчета.....71

3.4. Заключение.....75

Глава 4. Разработка держателя образцов для проведения широкополосных СВЧ измерений при криогенных температурах.....76

4.1. Введение.....76

4.2. Устройство держателя сверхпроводящих микросхем.....79

4.3. Экспериментальное исследование СВЧ характеристик держателя образцов.....86

4.4. Заключение.....90

Глава 5. Двумерный сверхпроводящий метаматериал на основе высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов).....92

5.1. Введение.....92

5.2. Разработка образцов двумерного метаматериала на основе ВЧ-СКВИДов.....93

5.3. Разработка камеры для оптических исследований двумерных сверхпроводящих метаматериалов.....95

5.4. Экспериментальное исследование отклика двумерного массива СКВИДов в зависимости от постоянного магнитного поля.....101

5.5. Экспериментальное исследование распределения СВЧ токов на двумерном массиве ВЧ-СКВИДов.....104

5.6. Заключение.....107

Заключение.....108

Список публикаций.....110

Список сокращений и обозначений.....111

Список используемой литературы.....112

Введение

Общая характеристика работы.

Данная Работа посвящена исследованию компактных сверхпроводящих резонаторов. Тема работы находится на стыке двух перспективных областей физики: метаматериалы и сверхпроводимость. Метаматериалы - это искусственно созданные среды, свойства которых обусловлены не столько свойствами материалов из которых они изготовлены, а искусственно созданной периодической структурой [1]. Сверхпроводимость – это физическое явление обращения электрического сопротивления материала в ноль при измерении на постоянном токе, сопровождающееся идеальным диамагнетизмом [1]. В представленной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование нескольких типов сверхпроводящих резонаторов: спирали Архимеда, кольцевого спирального резонатора, резонаторов на основе двойной спирали, а также двумерного массива высокочастотных квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов), характеризующихся преимущественной связью по магнитному полю. Был исследован отклик резонаторов на высоких частотах электромагнитного излучения, определена связь резонансных частот с размерами резонаторов и определены распределения токов собственных мод. Исследованные сверхпроводящие резонаторы могут быть использованы в качестве строительных блоков (мета-атомов) сверхпроводящих метаматериалов [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Актуальность темы.

Ряд перспективных применений сред с одновременной отрицательной диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ был теоретически описан В.Г. Веселаго в 1968 году [3]. Примерно через 30 лет первый практический пример материала с отрицательной эффективной

магнитной проницаемостью μ был продемонстрирован Джоном Пэндри [4]. Чтобы создать отрицательную магнитную проницаемость μ, Пэндри и его коллеги использовали массив разрезных кольцевых резонаторов (РКР). РКР взаимодействуют в основном с магнитной составляющей электромагнитного (ЭМ) поля и дают возможность создать среду с эффективным отрицательным μ. Первая демонстрация среды с отрицательными ε и μ была выполнена Смитом в 2000 году [5]. Они назвали такие искусственные среды метаматериалом. Метаматериал был построен из слоев медных РКР и слоев проводов. РКР имеют сильную связь с магнитной составляющей электромагнитного поля, а провода имеют сильную связь с электрической составляющей электромагнитного поля, действуя как электрические диполи.

Спиральный резонатор по сравнению с РКР обладает такой же сильной связью с магнитным полем, но гораздо меньшим размером по сравнению с длиной волны на резонансной частоте, чем РКР, из-за плотного размещения витков. Предыдущие эксперименты были выполнены с плоскими спиралями из толстых медных пленок (толщиной ~0.35 мм в [6], и толщиной ~0.25 мм в [7]) на диэлектрических подложках. Такое толстое покрытие требуется для минимизации омических потерь, что делает конструкцию промежуточной между 2-D и 3-D. Другим подходом к уменьшению размера спирального резонатора является использование структуры с двумя спиралями, расположенными одна над другой с тонким слоем диэлектрика между ними, изученными Ченом [8]. Размер такого резонатора на двойной спирали меньше чем λ/1300 [8].

Дальнейшая миниатюризация спиральных резонаторов, изготовленных из нормальных металлов, имеет свое естественное ограничение из-за масштабирования омических потерь с шириной и толщиной спирали [8, 9]. Для того чтобы избавиться от омических потерь и продемонстрировать резонатор, с размерами много меньшими длинны волны, представляется перспективным использовать сверхпроводящие спиральные резонаторы.

Сверхпроводящий спиральный резонатор и метаматериал, состоящий из одномерного массива сверхпроводящих спиральных Nb резонаторов, были изучены Кертер [10].

Стандартные сверхпроводящие резонаторы имеют резкие повороты линий: меандры с поворотами под углом 90 градусов [15, 16]. На резких поворотах сверхпроводников появляются области с высокой плотностью СВЧ токов и могут возникать горячие пятна (hot spots) [17]. В то время как, спиральные резонаторы имеют плавные изгибы линий, что позволяет избежать появления неоднородностей на пути протекания СВЧ токов и горячих пятен.

В этой работе мы исследуем компактные сверхпроводящие спиральные резонаторы, которые обладают сильной связью с магнитным полем и слабой связью с электрическим полем благодаря своей геометрии. Были исследованы несколько типов спиральных резонаторов: спиральный резонатор на основе спирали Архимеда, кольцевой спиральный резонатор, резонатор на основе двойной спирали. Спиральный резонатор на основе спирали Архимеда представлен на рисунке рис. 2.1б. Кольцевой спиральный резонатор (рис. 2.1а) представляет из себя спираль, у который витки начинаются не из центра, а с некоторого радиуса R (отсутствует центральная часть). Также были изучены ультра-компактные резонаторы на основе двойной спирали. Кроме того, был исследован метаматериал, состоящий из двумерного массива высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов).

Сверхпроводящие резонаторы используются для считывания сверхпроводящих кубитов [13], в детекторах на кинетической индуктивности MKID (Microwave Kinetic Inductance Detectors) [14], в однофотонных детекторах излучения SSPD (Superconducting Single Photon Detectors) [18], криогенных параметрических усилителях [19], для исследований

ферромагнетиков [20], а также в качестве элементов сверхпроводящих метаматериалов [21, 10].

Цель работы состояла в исследовании компактных сверхпроводящих высокочастотных резонаторов пригодных для использования в электромагнитных метаматериалах.

Задачи:

1. Выполнить численный расчет резонансных частот плоского спирального резонатора, изготовленного в виде спирали Архимеда. Построить рассчитанные зависимости амплитуд токов от радиуса спирального резонатора на резонансных частотах. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с аналитическими расчетами и с экспериментами.

2. Рассчитать резонансные частоты кольцевого спирального резонатора численно. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с аналитическими расчетами и с экспериментами.

3. Провести теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводящего резонатора на двойной спирали. Рассчитать резонансные частоты и распределения токов на них численно. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с экспериментом.

4. Разработать дизайн ультра-компактного спирального резонатора на основе двух спиралей в интегральном исполнении. Выполнить численный расчет резонатора на основе двух спиралей. Рассчитать зависимость резонансной частоты первой моды от расстояния между спиралями. Сравнить рассчитанные резонансные частоты с экспериментом.

5. Разработать и исследовать широкополосный держатель образцов сверхпроводящих микросхем, предназначенный для СВЧ экспериментов при сверхнизких температурах, до нескольких мили-Кельвинов.

6. Разработать камеру для оптических исследований двумерных сверхпроводящих метаматериалов.

7. Измерить микроволновый отклик отдельных мета-атомов сверхпроводящей мета-поверхности, образованной двумерным массивом сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов). Измерить зависимость резонансной частоты массива ВЧ-СКВИДов от внешнего магнитного поля. Получить изображения распределений высокочастотных токов на мета-атомах.

Методы.

Численные расчеты проводились в коммерческой программе трехмерного электромагнитного моделирования High Frequency Structure Simulator (HFSS), разработанной фирмой ANSYS [22]. Эта программа выполняет расчет электромагнитных полей в трехмерных моделях методом конечных элементов.

Экспериментальные измерения резонансных частот сверхпроводящих образцов проводились в криостате замкнутого цикла Triton 1.5 K, изготовленного Oxford Instruments [23]. Резонатор был смонтирован внутри медного держателя образцов. В держателе образец размещался между двумя возбуждающими кольцами, присоединенными к коаксиальным кабелям. Держатель образца устанавливался внутри криостата и подключался к векторному анализатору цепей (ВАЦ) Rohde&Schwartz ZVB20 [24] при помощи коаксиальных кабелей. Коэффициент передачи S21 между двумя кольцами измерялся при помощи ВАЦ.

Измерения распределений высокочастотных токов в образцах сверхпроводящих резонаторов и метаматериалов выполнялись при помощи лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ) [25].

Основные положения выносимые на защиту:

1. Собственные частоты резонатора на спирали Архимеда зависят от длины спиральной линии и соотносятся как числа натурального ряда, в пропорции: 1:2:3... Собственные частоты и распределение токов на поверхности спирального резонатора, рассчитанные численно, подтверждаются в эксперименте.

2. Резонансные частоты кольцевого спирального резонатора, то есть спирального резонатора без центральной части, зависят от длины спиральной линии и соотносятся как числа в ряду нечетных чисел: 1; 3; 5; 7..., при отношении внутреннего радиуса спирали к внешнему от 0.7 до 1.

3. Наложение двух спиральных проводников, закрученных в противоположных направлениях, позволяет создать ультра-компактный высокочастотный резонатор с магнитной связью. В ультра-компактном сверхпроводящем резонаторе на двойной спирали на резонансной частоте достигается отношение диаметра к длине волны $D/\lambda=14400$.

4. Продемонстрирован когерентный отклик двумерного массива высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов).

Научная новизна:

1. Впервые детально исследованы распределения токов и полей первых шести мод высокочастотного резонатора на основе спирали Архимеда и кольцевого спирального резонатора.

2. Впервые показано, что резонансные частоты кольцевого спирального резонатора следуют соотношению ряда нечетных чисел: 1; 3; 5; 7... , при отношении внутреннего радиуса спирали к внешнему от 0.7 до 1.

3. Предложен и исследован сверхпроводящий ультра-компактный резонатор на двойной спирали. Численно рассчитанные резонансные частоты и распределения токов на них хорошо совпали с экспериментом на лазерном сканирующем микроскопе (ЛСМ).

4. Впервые предложен и исследован ультра-компактный сверхпроводящий резонатор на двойной спирали в виде интегральной схемы. Достигнутый диаметр ультра-компактного резонатора относительно длинны волны $D=\lambda/14400$.

5. Впервые получены изображения распределений высокочастотных токов на сверхпроводящем метаматериале, образованного двумерным массивом сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов).

Практическая значимость работы связана с возможностью использования полученных результатов для создания резонаторов для считывания сверхпроводящих кубитов [13], сверхпроводящих болометров [18], криогенных параметрических усилителей [19] и сверхпроводящих метаматериалов [21, 10]. А также, в системах беспроводной передачи энергии [26] и для создания антенн для магнитно-резонансной томографии [27].

Личный вклад. Автор принимал активное участие в расчете и разработке экспериментальных образцов, усовершенствовании внутренней оснастки криостата, подготовке экспериментальных образцов, проведении измерений, обработке полученных результатов и написании статей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: международная конференция “Metamaterials 2016” (Ханья, Греция 2016 г.), международная конференция

“Applied Superconductivity Conference” (Денвер, США 2016 г.), международная конференция “EUCAS 2015” (Лион, Франция 2015 г.), международная конференция "Metamaterials 2015", (Оксфорд, Англия 2015 г.), международная конференция "Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems" (Москва, Россия 2015 г.), международная конференция “The 36th PIERS”, (Прага, Чехия 2015 г.), международная конференция "Metamaterials 2014" (Копенгаген, Дания 2014 г.), конференция “Basic Problems of Optics” (Санкт-Петербург, Россия, 2014 г.), международная конференция "Metamaterials 2013", (Бордо, Франция, 2013 г.), а также на научных семинарах Физического института Технологического Университета Карлсруэ и лаборатории “Сверхпроводящие метаматериалы” МИСиС.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Web of Science, а также в 1 сборнике трудов международной конференции.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация состоит из 118 страниц.

Во введении сформулированы задачи и цели диссертации, обусловлена ее актуальность, представлены защищаемые положения, обозначены научная новизна и практическая значимость работы, представлена структура диссертации.

Глава 1 (Обзор литературы) посвящена обзору теоретических и экспериментальных методов, используемых для исследования сверхпроводящих резонаторов.

Глава 2 посвящена исследованию сверхпроводящих спиральных элементов метаматериалов, а именно, резонаторов на основе спирали Архимеда и кольцевого спирального резонатора. В разделе 2.2 выполнено теоретическое и экспериментальное исследование электродинамики плоского

спирального сверхпроводящего резонатора. Резонатор выполнен в виде монофилярной архимедовой спирали. В программе HFSS построена расчетная модель спирали Архимеда, размещенной между двумя возбуждающими кольцами. Вычислены резонансные частоты. На резонансных частотах вычислены соответствующие неоднородные распределения ВЧ токов f(R), где R координата вдоль радиуса спирали. Наш анализ электродинамических свойств спиральных резонаторов находится в хорошем согласии с аналитическим расчетом и измерениями, выполненным с использованием специально разработанного магнитного зонда и лазерного сканирующего микроскопа. В разделе 2.3 выполнены исследования электромагнитного резонатора, выполненного в виде монофилярного архимедова спирального резонатора, сформированного в виде кольца, без центральной части. Плоские спиральные резонаторы интересны как компоненты метаматериалов благодаря их компактным суб-волновым размерам. Такие резонаторы связываются в основном с компонентой магнитного поля, падающей электромагнитной волны. Относительные частоты резонансных мод следуют последовательности нечетных чисел как f1: f2: f3: f4 ... =1: 3: 5: 7 ..., несмотря на почти одинаковые граничные условия для электромагнитных полей на концах резонатора. Численно рассчитанные резонансные частоты и распределения тока находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и результатами аналитической модели. Используя низкотемпературную лазерную сканирующую микроскопию сверхпроводящего спирального резонатора, мы сравниваем экспериментальные визуализированные распределения переменного тока на спирали с расчетными. Теория и эксперимент хорошо согласуются друг с другом.

Глава 3 посвящена исследованию ультра-компактных магнитных мета-атомов на основе двойной спирали. В разделе 3.2 описана практическая конструкция сверхкомпактного двух-спирального сверхпроводящего Nb

микро-резонатора в качестве потенциального магнитного элемента высокочастотного метаматериала. Этот резонатор состоит из двух сверхпроводящих Nb спиралей, размещенных лицом к лицу, с небольшим зазором, заполненным диэлектриком. Мы изучаем спектральный отклик резонатора и его внутренние моды, используя численное моделирование в HFSS. В эксперименте с лазерным сканирующим микроскопом (ЛСМ) мы подтверждаем предсказания резонансных частот Nb сверхпроводящего резонатора и структуру его внутренних мод. Достигнутый размер резонатора относительно длины волны на фундаментальной резонансной частоте в нашем эксперименте около λ/4200. Малый размер и простота изготовления делают двух-спиральный резонатор привлекательным решением для сверхпроводящих фильтров, схем связи и в качестве магнитного компонента метаматериалов. В разделе 3.3 описан практический дизайн ультра-компактного сверхпроводящего микро-резонатора в интегральном исполнении в качестве потенциального магнитного элемента метаматериала. Достигнутый размер резонатора относительно длины волны на фундаментальной резонансной частоте в нашем эксперименте составляет около λ/14400. Резонатор состоит из двух сверхпроводящих спиралей Nb, расположенных между собой, с небольшим зазором, заполненным диэлектриком. Спирали закручены в противоположных направлениях: одна по часовой стрелке, другая против часовой стрелки. Мы изучаем спектральный отклик резонатора и его внутренние моды с использованием численного моделирования в программе HFSS. В эксперименте с лазерным сканирующим микроскопом (ЛСМ) мы подтверждаем предсказания резонансных частот сверхпроводящего резонатора Nb и структуру его внутренних мод. Малый размер и простота изготовления делают двух-спиральный резонатор привлекательным решением для сверхпроводящих фильтров, схем связи и в качестве магнитного компонента метаматериала.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию широкополосного держателя образцов сверхпроводящих микросхем, предназначенного для СВЧ экспериментов при сверхнизких температурах, до нескольких мили-Кельвинов. В разделе 4.2 описано устройство держателя сверхпроводящих микросхем. Предложенная конструкция может быть легко интегрирована в стандартные криостаты, имеет рабочий диапазон частот от 0 до 32 ГГц, и позволяет проводить СВЧ измерение образцов с размером подложки до 4×4 мм^2. В разделе 4.3 описано экспериментальное исследование СВЧ характеристик держателя образцов. Проанализированы и предотвращены паразитные резонансы в держателе. Мы использовали разработанный держатель образца при измерении характеристик сверхпроводящего потокового кубита при температуре 20 мК.

Глава 5 посвящена исследованию микроволнового отклика отдельных мета-атомов сверхпроводящей мета-поверхности, образованной двумерным массивом сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов). В разделе 5.2. описана разработка образцов двумерного метаматериала на основе ВЧ-СКВИДов. В разделе 5.3 описана разработка камеры для оптических исследований двумерных сверхпроводящих метаматериалов. Разработанная камера была использована для измерения отклика двумерного перестраиваемого метаматериала на основе массива высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов). В разделе 5.4. описано экспериментальное исследование отклика двумерного массива ВЧ-СКВИДов в зависимости от частоты СВЧ сигнала и от постоянного магнитного поля. В разделе 5.5 описано экспериментальное исследование распределения СВЧ токов на двумерном массиве ВЧ-СКВИДов. Мы использовали лазерный сканирующий микроскоп (ЛСМ) для пространственного разрешения резонансного отклика отдельных ВЧ-СКВИДов, являющихся мета-атомами в образце 2D метаматериала.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы.

Глава 1

Обзор литературы

1.1. Введение.

В этой главе сделан обзор теоретических и экспериментальных методов, используемых для исследования метаматериалов. В разделе 1.2 сделан обзор литературы по теме метаматериалов. Раздел 1.3 посвящен описанию сверхпроводящих метаматериалов. В разделе 1.4 описаны сверхпроводящие микро-резонаторы и их применение в сверхпроводящих метаматериалах и других приложениях. Раздел 1.5 посвящен описанию лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ). В этой работе ЛСМ был использован для экспериментальных измерений распределений СВЧ токов в образцах сверхпроводящих метаматериалов. В разделе 1.6 описана работа программы трехмерного электромагнитного моделирования High Frequency Structure Simulator (HFSS), разработанной фирмой ANSYS [22]. Эта программа позволяет выполнять расчет электромагнитных полей в трехмерных моделях методом конечных элементов. Все численные расчеты, выполненные в данной работе производились в программе HFSS.

1.2. Электродинамика метаматериалов.

Метаматериалы – искусственно созданные среды, свойства которых обусловлены не столько свойствами материалов из которых они изготовлены, а искусственно созданной периодической структурой [1]

Ряд перспективных применений сред с одновременной отрицательной диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью μ был теоретически описан В. Г. Веселаго в 1968 году [3]. Примерно через 30 лет первый практический пример материала с отрицательной эффективной магнитной проницаемостью μ был продемонстрирован Джоном Пэндри [4].

Чтобы создать отрицательную магнитную проницаемость μ, Пэндри и его коллеги использовали массив разрезных кольцевых резонаторов (РКР). РКР взаимодействуют в основном с магнитной составляющей электромагнитного (ЭМ) поля и дают возможность создать среду с эффективным отрицательным μ. Обычно для создания среды с отрицательной магнитной проницаемостью используются разрезные кольцевые резонаторы (рис. 1.1).

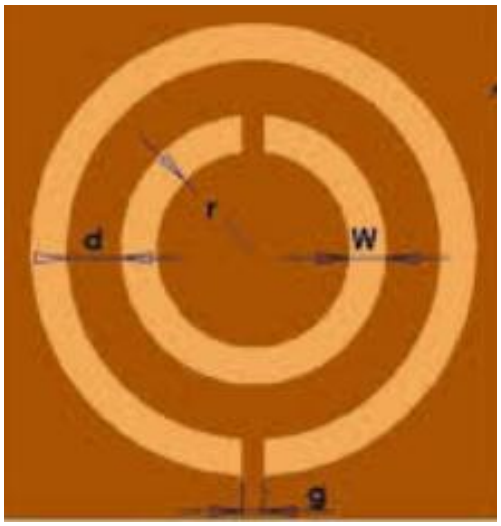


Рис. 1.1. Чертеж разрезного кольцевого резонатора. Проводник показан светлым цветом, диэлектрическая подложка темным цветом.

Первая демонстрация среды с отрицательными ε и μ была выполнена Смитом в 2000 году (рис. 1.2) [5]. Они назвали такие искусственные среды метаматериалом. Метаматериал был построен из слоев медных РКР и слоев проводов. РКР имеют сильную связь с магнитной составляющей электромагнитного поля, а провода имеют сильную связь с электрической составляющей электромагнитного поля, действуя как электрические диполи.



Рис. 1.2. Фотография СВЧ метаматериала с отрицательным показателем преломления.

Спиральный резонатор (рис. 1.3) по сравнению с РКР обладает такой же сильной связью с магнитным полем, но гораздо меньшим размером по сравнению с длиной волны на резонансной частоте, чем РКР, из-за плотного размещения витков [6].

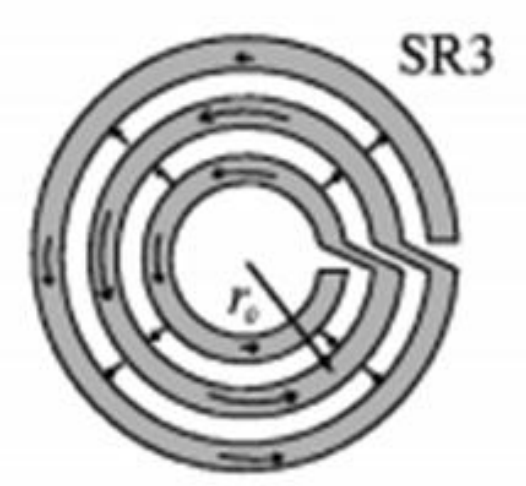


Рис. 1.3. Эскиз спирального СВЧ резонатора.

Предыдущие эксперименты были выполнены с плоскими спиралями из толстых медных пленок (толщиной ~0.35 мм в [6], и толщиной ~0.25 мм в [7]) на диэлектрических подложках. Такое толстое покрытие требуется для минимизации омических потерь, что делает конструкцию промежуточной между 2-D и 3-D. Другим подходом к уменьшению размера спирального резонатора является использование структуры с двумя спиралями (рис. 1.4), расположенными одна над другой с тонким слоем диэлектрика между ними, изученными Ченом [8]. Размер такого резонатора на двойной спирали меньше чем λ/1300 [8].

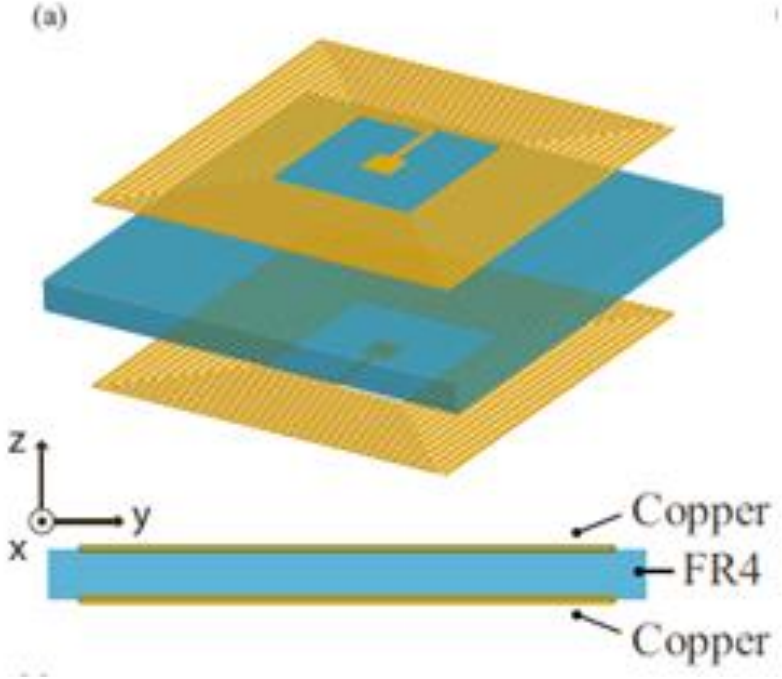


Рис. 1.4. Топология СВЧ резонатора, состоящего из двух спиралей.

Дальнейшая миниатюризация спиральных резонаторов, изготовленных из нормальных металлов, имеет свое естественное ограничение из-за масштабирования омических потерь с шириной и толщиной спирали [8, 9]. Для того чтобы избавиться от омических потерь и продемонстрировать резонатор, с размерами много меньшими длинны волны, представляется перспективным использовать сверхпроводящие спиральные резонаторы.

1.3. Сверхпроводящие микро-резонаторы и их применение.

Миниатюризация спиральных резонаторов, изготовленных из нормальных металлов, имеет свое естественное ограничение из-за масштабирования омических потерь с шириной и толщиной спирали [8, 9]. Для того чтобы избавиться от омических потерь и продемонстрировать резонатор, с размерами много меньшими длинны волны, представляется перспективным использовать сверхпроводящие спиральные резонаторы. Сверхпроводящий спиральный резонатор (рис. 1.5) и метаматериал, состоящий из одномерного массива сверхпроводящих спиральных Nb резонаторов, были изучены Кертер и др. [10]. Спиральный резонатор из высокотемпературного сверхпроводника был изучен Гхамсари и др. [11].

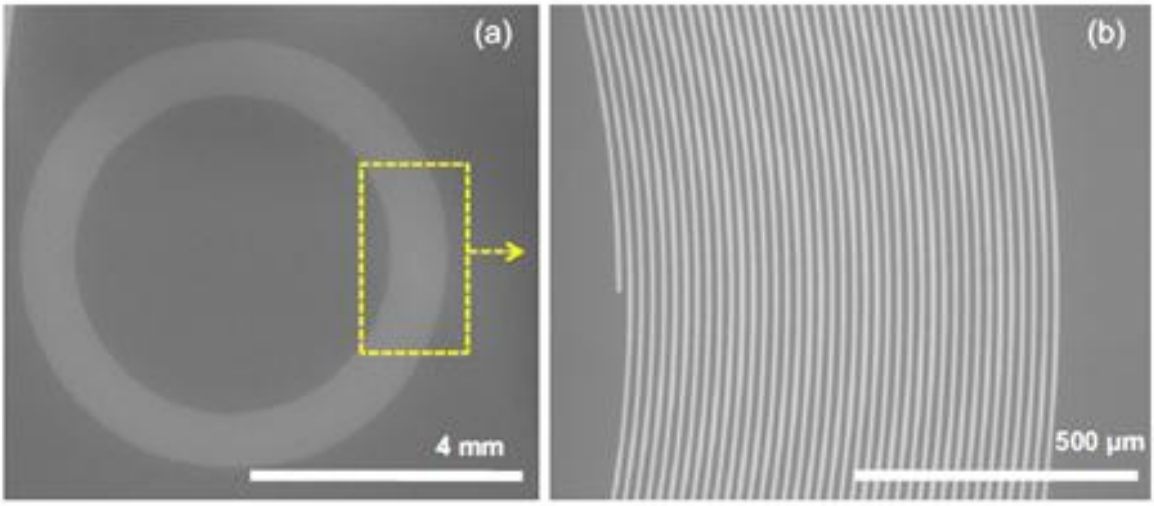


Рис. 1.5. Фотография первого сверхпроводящего спирального СВЧ резонатора.

Стандартные сверхпроводящие резонаторы имеют резкие повороты линий: меандры с поворотами под углом 90 градусов [15, 16]. На резких поворотах сверхпроводников появляются области с высокой плотностью СВЧ токов и могут возникать горячие пятна (hot spots) [17]. В то время как,

спиральные резонаторы имеют плавные изгибы линий, что позволяет избежать появления неоднородностей на пути протекания СВЧ токов и горячих пятен.

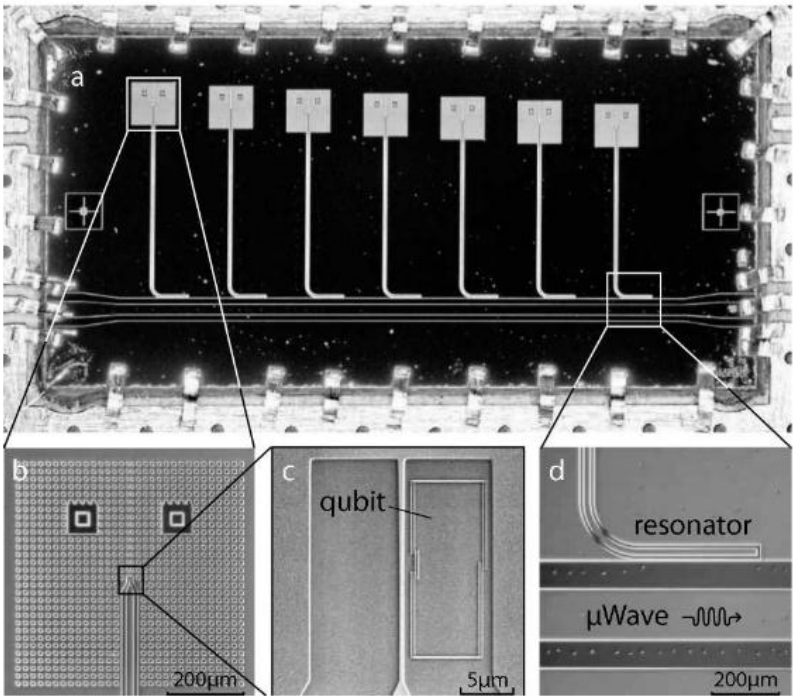


Рис. 1.6. Фотография чипа с семью потоковыми кубитами, каждый из которых связан с четверть волновым СВЧ резонатором. Длины резонаторов отличаются на небольшую величину, что позволяет независимо считывать состояние каждого кубита.

Сверхпроводящие микро-резонаторы находят множество применений: считывание сверхпроводящих кубитов (рис. 1.6) [13, 72], детекторы на кинетической индуктивности MKID (Microwave Kinetic Inductance Detectors) [14], однофотонные детекторы излучения SSPD (Superconducting Single Photon Detectors) (рис. 1.7) [18], криогенные параметрические усилители [19], для исследований ферромагнетиков [20], а также в качестве элементов сверхпроводящих метаматериалов [21, 10].

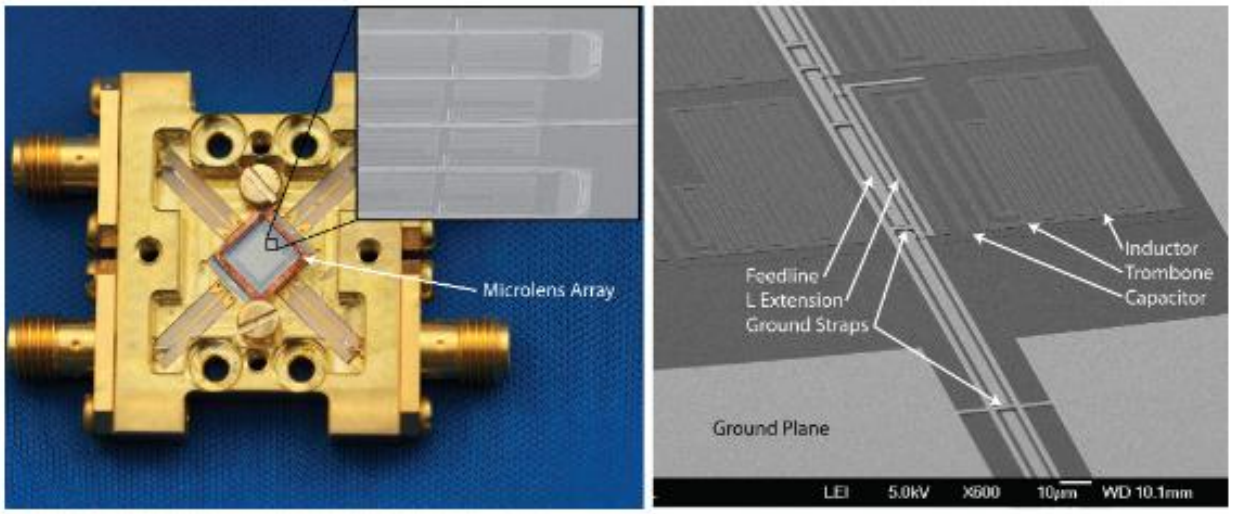


Рис. 1.7. Фотография сверхпроводящего детектора на кинетической индуктивности.

В этой работе выполнено исследование сверхпроводящих спиральных резонаторов, которые обладают сильной связью с магнитным полем и слабой связью с электрическим полем благодаря своей геометрии. Были исследованы несколько типов спиральных резонаторов: спиральный резонатор на основе спирали Архимеда, кольцевой спиральный резонатор, резонатор на основе двойной спирали. Спиральный резонатор на основе спирали Архимеда представлен на рисунке рис. 2.1б. Кольцевой спиральный резонатор (рис. 2.1а) представляет из себя спираль, у который витки начинаются не из центра, а с некоторого радиуса (отсутствует центральная часть). Также были изучены ультра-компактные резонаторы на основе двойных спирали. Кроме того, был исследован метаматериал, состоящий из двумерного массива высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов).

1.4. Контакт Джозефсона. Сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы).

Контакт Джозефсона это туннельный контакт двух сверхпроводников, разделенных тонким барьером [44]. Уравнение для стационарного эффекта Джозефсона [42]:

$$\mathbf{I = I_c * \sin \varphi} \qquad (1.5.1),$$

где, $\mathbf{I_c}$ – критический ток джозефсоновского контакта,

$\boldsymbol{\varphi}$ – разность фаз сверхпроводящего параметра порядка в двух сверхпроводниках.

Уравнение для нестационарного эффекта Джозефсона [42]:

$$\mathbf{2eU} = \hbar * \dot{\boldsymbol{\varphi}} \qquad (1.5.2),$$

где, e – заряд электрона,

$\mathbf{U}$ – разность напряжений между двумя берегами джозефсоновского контакта,

$\hbar$ – постоянная Планка,

$\dot{\boldsymbol{\varphi}}$ – производная от фазы сверхпроводящего параметра порядка по времени.

Джозефсоновская энергия [42]:

$$\mathbf{Ej} = \hbar \mathbf{I_c}/\mathbf{2e} \qquad (1.5.3)$$

Плазменная частота джозефсоновского контакта [42]:

$$\mathbf{wp} = \left(\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Lj}*\mathbf{C}}\right)^{\mathbf{0.5}} = \left(\frac{\mathbf{2\pi I_c}}{\mathbf{C\Phi_0}}\right)^{\mathbf{0.5}} \qquad (1.5.4)$$

Кулоновская энергия [42]:

$$\mathbf{Ec} = \mathbf{e^2/2C} \qquad (1.5.5)$$

Контакт Джозефсона можно представить, используя эквивалентную схему или RCSJ (resistively and capacitevly shunted junction) модель [43]. В этой модели физический контакт Джозефсона представляют как идеальный контакт Джозефсона шунтированный конденсатором и резистором. Ток через контакт равен сумме токов через конденсатор, резистор и сверхтока:

$$\mathbf{I(t)} = \mathbf{Id} + \mathbf{In} + \mathbf{Is}$$

Ток через конденсатор равен $\mathbf{Id} = \mathbf{C\dot{U}}$. Ток через резистор равен $\mathbf{In} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{R}}$. Ток через идеальный контакт Джозефсона в соответствии с первым уравнением Джозефсона (1) равен $\mathbf{Is} = \mathbf{Ic} * \mathbf{\sin\varphi}$. Тогда, суммарный ток через контакт Джозефсона равен:

$$\mathbf{I(t)} = \mathbf{C\dot{U}} + \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{R}} + \mathbf{Ic} * \mathbf{\sin\varphi} \qquad (1.5.6)$$

Падение напряжение на контакте Джозефсона в соответствии со вторым уравнением Джозефсона равно $\mathbf{U} = \hbar*\mathbf{\dot{\varphi}}/(2e)$. Подставим падение напряжения из формулы (1.5.2) в формулу (1.5.6), тогда:

$$\mathbf{I(t)} = \frac{\hbar\mathbf{C}}{\mathbf{2e}}\mathbf{\ddot{\varphi}} + \frac{\hbar}{\mathbf{2eR}}\mathbf{\dot{\varphi}} + \mathbf{Ic}\ \mathbf{\sin\varphi} \qquad (1.5.7)$$

На основе контакта джозефсона были разработаны два типа сверхпроводящих квантовых интерферометров: сверхпроводящий квантовый интерферометр постоянного тока (ПТ-СКВИД) и высокочастотный сверхпроводящий квантовый интерферометр (ВЧ-СКВИД).

ВЧ-СКВИД состоит из контакта джозефсона, вставленного в разрыв сверхпроводящего кольца, как показано на Рис. 1.8а. Контакт обозначен красным крестом. В приближении малого сигнала джозефсоновский контакт может быть представлен как нелинейная индуктивность [38, 44].

ПТ-СКВИД состоит из сверхпроводящего кольца, в разрывы которого вставлены 2 контакта джозефсона. К ПТ-СКВИДу подключают два проводника для того чтобы пропускать через него постоянный ток.

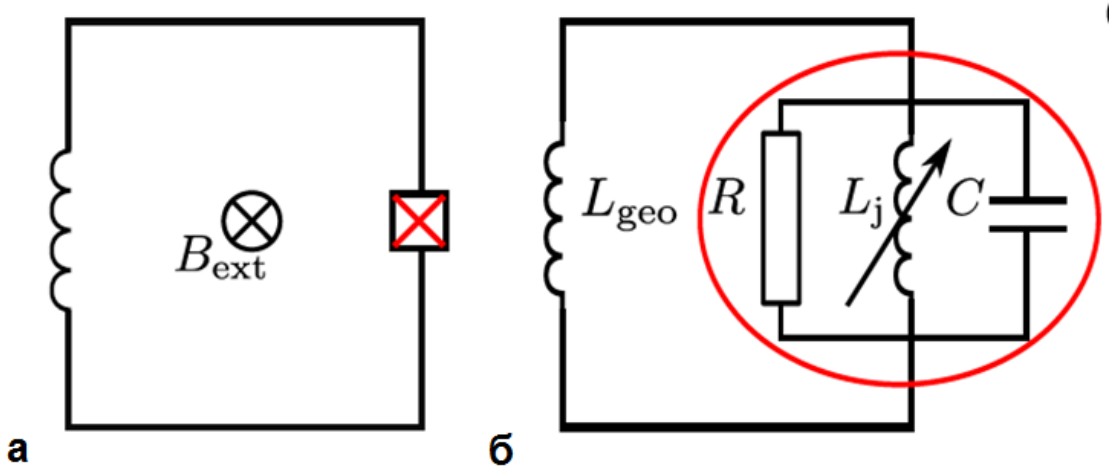


Рис. 1.8 (а) Схематическое изображение ВЧ-СКВИДа. Контакт Джозефсона обозначен красным крестом. (б) Эквивалентная электрическая схема ВЧ-СКВИДа в приближении малого сигнала. L_{geo} – геометрическая индуктивность кольца ВЧ-СКВИДа. Часть эквивалентной электрической схемы, соответствующая джозефсоновскому контакту, выделена красным овалом: R – сопротивление, обусловленное током квазичастиц; L_j – джозефсоновская индуктивность; C – шунтирующая емкость перекрытия сверхпроводящих электродов.

Если джозефсоновская индуктивность Lj размещена внутри сверхпроводящего кольца, то она может быть перестроена внешним магнитным полем. Общая индуктивность ВЧ-СКВИДа L_{tot} состоит из геометрической индуктивности L_{geo} сверхпроводящего кольца и из джозефсоновской индуктивности L_j. Эквивалентная электрическая схема

представлена на Рис. 1.8б. Красным кругом обозначена эквивалентная электрическая схема джозефсоновского контакта, для которого использована модель контакта, шунтированная резистором и емкостью [44]. Также как разрезной кольцевой резонатор (РКР) ВЧ-СКВИД может быть представлен как LC резонатор. Однако, в отличие от РКР общая индуктивность и, следовательно, резонансная частота ВЧ-СКВИДа может быть перестроена, в том случае если переменная компонента магнитного поля мала.

1.5. Сверхпроводящие метаматериалы.

Исследования сверхпроводящих метаматериалов вызывают большой интерес [21]. В частности, на исследования сверхпроводящих метаматериалов на основе контакта Джозефсона. На основе джозефсоновского контакта были созданы множество сверхпроводящих устройств, в частности сверхпроводящие квантовые интерферометры, работающие на постоянном токе (ПТ-СКВИДы), высокочастотные сверхпроводящие квантовые интерферометры (ВЧ-СКВИДы) [44] и квантовые биты.

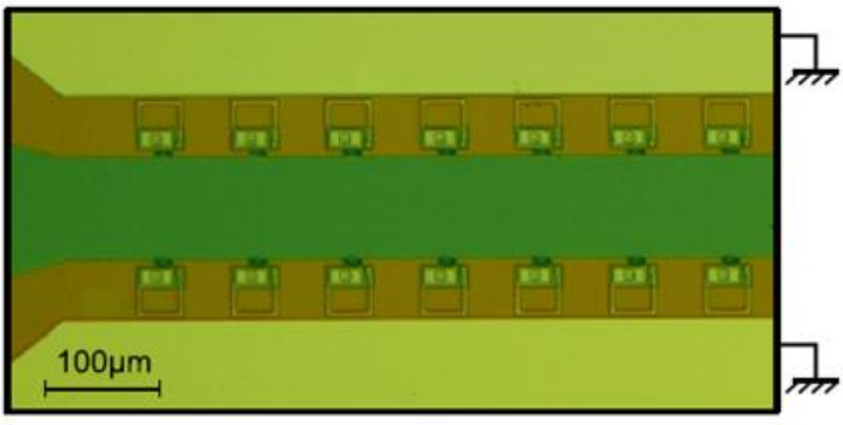


Рис. 1.9. Фотография образца одномерного сверхпроводящего метаматериала, изготовленного на основе одномерного массива ВЧ-СКВИДов.

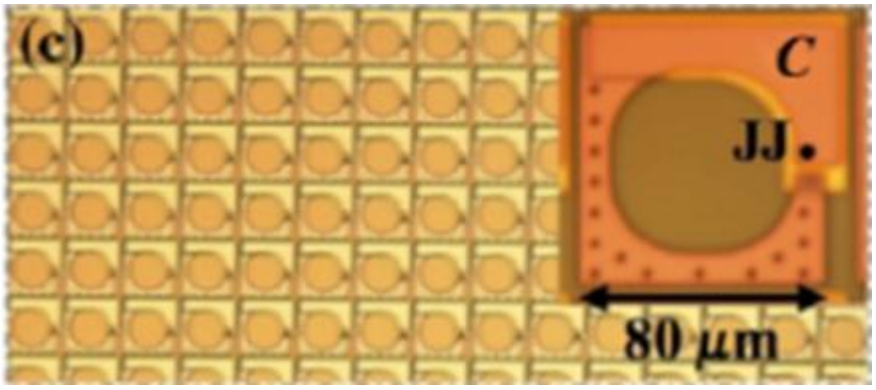


Рис. 1.10. Фотография двумерного массива ВЧ-СКВИДов.

Были экспериментально исследованы сверхпроводящие джозефсоновские метаматериалы на основе одномерного массива ВЧ-СКВИДов (рис. 1.9) [12]. Значительное внимание приобретают исследования ВЧ сверхпроводящих метаматериалов, в частности сверхпроводящих метаповерхностей [21, 29]. Двумерный массив высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов) имеет ряд полезных применений. Поскольку СКВИД может быть использован в качестве магнито-связанного ВЧ микро-резонатора, то это хороший кандидат на роль магнитного мета-атома, резонансная частота которого может быть перестроена внешним магнитным полем. Отклик массива ВЧ-СКВИДов был изучен теоретически [29-31] и, в некоторой степени, экспериментально [32]. Фотография двумерного массива ВЧ-СКВИДов представлена на рисунке 1.10. В работе [32] была продемонстрирована возможность перестройки резонансной частоты массива ВЧ-СКВИДов постоянным магнитным полем, температурой и мощностью СВЧ сигнала.

Большой интерес привлечен к исследованиям сверхпроводящих квантовых битов [34, 35], которые являются структурными элементами квантовых компьютеров. Также были созданы и исследованы квантовые метаматериалы [35, 36] на основе двумерных массивов сверхпроводящих квантовых битов.

1.6. Лазерный сканирующий микроскоп.

В этой работе лазерный сканирующий микроскоп (ЛСМ) был разработан для измерения распределений СВЧ токов в сверхпроводящих образцах [17, 25, 33, 40]. В данной работе ЛСМ использовался для экспериментальных измерений распределений СВЧ токов в образцах сверхпроводящих метаматериалов. Схема ЛСМ показана на рисунке 1.11.

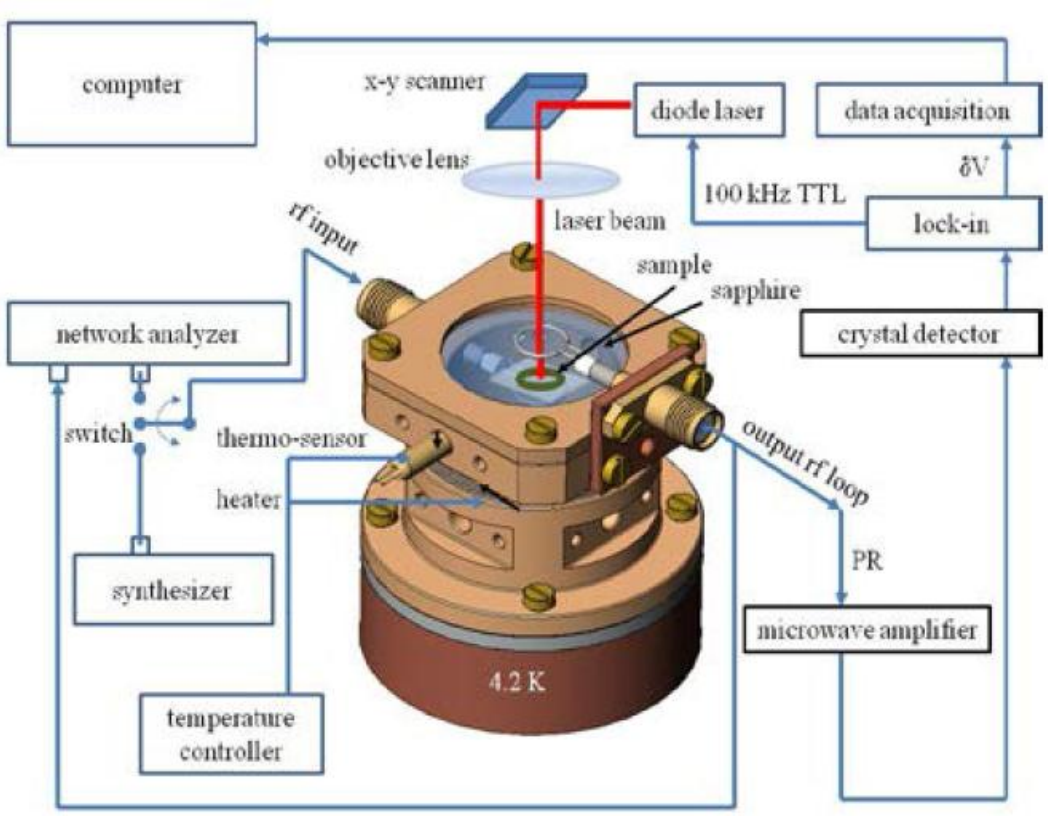


Рис. 1.11. Схема экспериментальной установки лазерного сканирующего микроскопа.

На рисунке 1.11 исследуемый образец (желтое кольцо) монтируется в держателе образца (в центре рисунка) между двумя магнитными кольцевыми петлями. Магнитные петли подключены к 50-омным СВЧ линиям передачи. Зондирующий сигнал подается на верхнюю петлю по коаксиальному кабелю от СВЧ генератора и принимается на нижней петле. Сигнал от нижней петли

приходит на комнатные усилители СВЧ мощности и затем на детекторный диод по коаксиальным кабелям. С детекторного диода сигнал приходит на вход синхронного детектора (lock-in amplifier). С выхода синхронного детектора сигнал приходит на плату сбора данных, установленную в компьютере.

Одновременно с измерением отклика образца на СВЧ, образец сканируется сфокусированным лазерным лучом. Лазерный луч и синхронный детектор модулируются одним и тем же видеоимпульсом с частотой *f=100* кГц, для того чтобы увеличить отношение сигнала к шуму с помощью метода синхронного детектирования. Лазерный луч генерирует локальные квазичастицы в сверхпроводнике, вызывая потери. Наведенные потери пропорциональны локальной амплитуде СВЧ-тока. Сканируя образец лазерным лучом, мы получаем карту распределения амплитуды СВЧ тока на образце.

1.7. Описание работы программы High Frequency Structure Simulator (HFSS).

Все численные расчеты, описанные в данной работе, выполнены в коммерческой программе трехмерного электромагнитного моделирования High Frequency Structure Simulator (HFSS), разработанной фирмой ANSYS [22]. Эта программа выполняет расчет высокочастотных электро-магнитных полей в трехмерных моделях методом конечных элементов.

HFSS использует следующие типы граничных условий:

• Порт
• Идеальная магнитная стенка
• Симметричная магнитная стенка
• Идеальная электрическая стенка
• Симметричная электрическая стенка

• Экранирующая плоскость

• Проводник с конечной проводимостью

• Резистивная поверхность

• Поверхность излучения

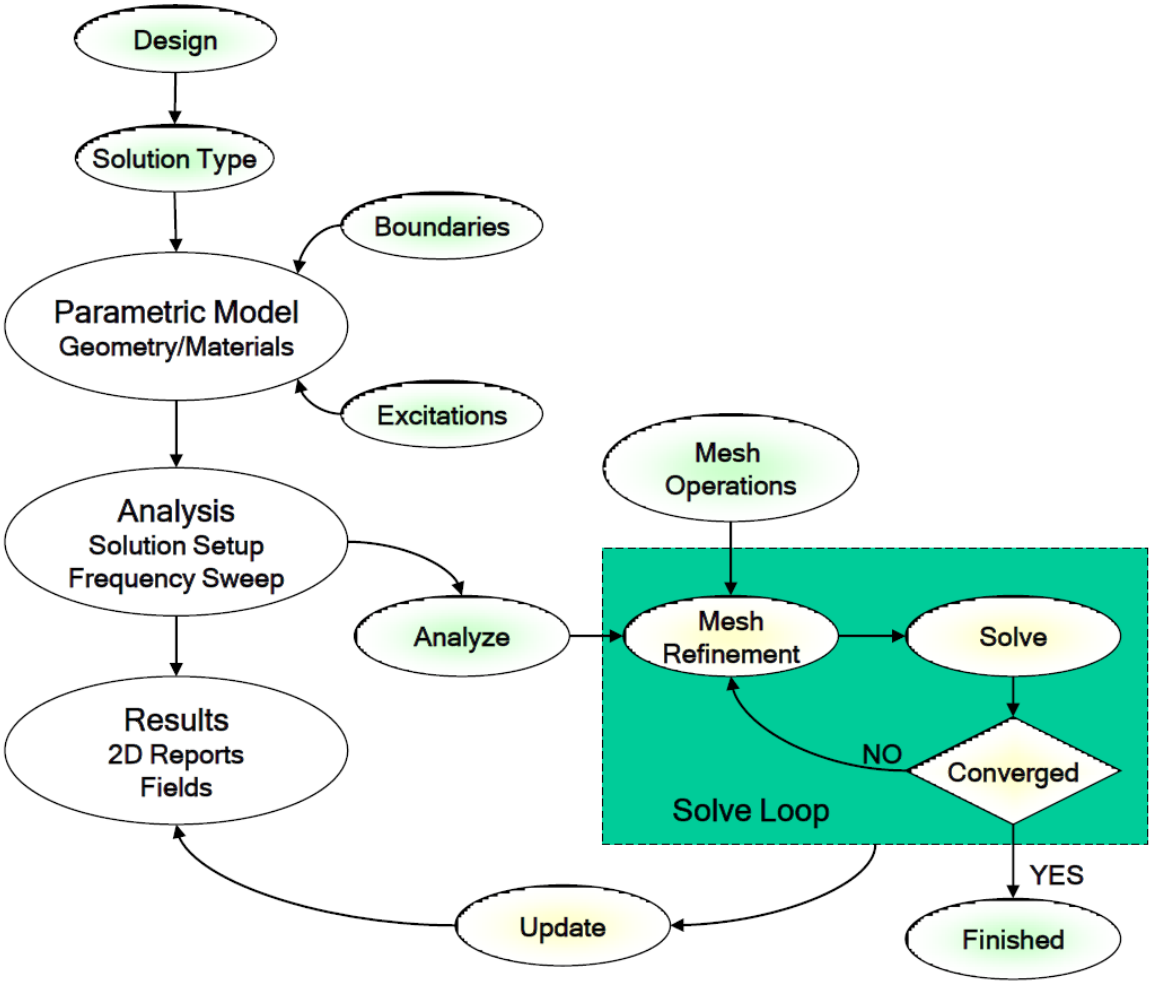


Рис. 1.12 Алгоритм решения задачи в программе HFSS.

Программа HFSS решает уравнения Максвелла в трехмерной расчетной модели. Алгоритм решения задачи в HFSS представлен на рисунке 1.12 [71]. Сначала в программе HFSS создается проект. Затем требуется выбрать метод расчета. В программе существуют два основных метода расчетов: DrivenModal и EigenMode. При решении методом DrivenModal необходимо использовать внешние или внутренние источники возбуждения (порты). При

расчете методом EigenMode порты не требуются и программа ищет собственные резонансные частоты расчетной модели.

На третьем этапе алгоритма (рис 1.12) необходимо нарисовать расчетную модель, состоящую из 2D и 3D объектов. Затем объектам присваиваются электрические свойства из библиотеки материалов. Модели присваиваются граничные условия: источники возбуждения (порты), на внешние границы модели назначаются граничные условия. Затем в свойствах решения необходимо задать частоту решения и критерий сходимости. И запустить расчет.

В случае решения методом DrivenModal при использовании внешнего источника возбуждения (WavePort) программа будет сначала решать задачу в плоскости портов. Внешние порты программа рассматривает в приближении полу-бесконечных волноводов. Когда решение в портах найдено, то программа начинает решать задачу внутри трехмерной расчетной модели. В случае решения методом EigenMode программа будет искать собственные резонансные частоты расчетной модели. В процессе расчета программа ищет решение итерационным методом. На каждой итерации программа проводит разбиение расчетной модели сеткой из тетраэдров произвольной формы. Для расчетной модели разбитой сеткой программа решает уравнения Максвелла методом конечных элементов. На каждой итерации программа вычисляет коэффициенты передачи и отражения между портами расчетной модели. Затем находит разность dS между коэффициентами передачи, вычисленными на двух соседних итерациях n и n-1. Найденная разность dS сравнивается с критерием сходимости. Если критерий сходимости не выполнен, то программа переходит к следующей итерации не которой уплотняет сетку разбиения расчетной модели и продолжает вычисление по описанному выше алгоритму. Если критерий сходимости выполнен, то решение найдено. И программа может вычислить характеристики расчетной модели в заданном

диапазоне частот. Найденные решения можно отобразить в виде графиков и распределений токов и полей в расчетной модели.

1.8. Постановка задачи.

После проведенного обзора литературы были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить численный расчет резонансных частот плоского спирального резонатора, изготовленного в виде спирали Архимеда. Построить рассчитанные зависимости амплитуд токов от радиуса спирального резонатора на резонансных частотах. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с аналитическими расчетами и с экспериментами.

2. Рассчитать резонансные частоты кольцевого спирального резонатора численно. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с аналитическими расчетами и с экспериментами.

3. Провести теоретическое и экспериментальное исследование сверхпроводящего резонатора на двойной спирали. Рассчитать резонансные частоты и распределения токов на них численно. Сравнить результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них с экспериментом.

4. Разработать дизайн ультра-компактного спирального резонатора на основе двух спиралей в интегральном исполнении. Выполнить численный расчет резонатора на основе двух спиралей. Рассчитать зависимость резонансной частоты первой моды от расстояния между спиралями. Сравнить рассчитанные резонансные частоты с экспериментом.

5. Разработать держатель для проведения широкополосных СВЧ измерений сверхпроводящих образцов при криогенных температурах. В держателе образцов должны быть подавлены паразитные СВЧ резонансы в диапазоне частот от 0 до 32 ГГЦ.

6. Разработать камеру для оптических исследований двумерных сверхпроводящих метаматериалов.

7. Измерить микроволновый отклик отдельных мета-атомов сверхпроводящей мета-поверхности, образованной двумерным массивом сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов). Измерить зависимость резонансной частоты массива ВЧ-СКВИДов от внешнего магнитного поля. Получить изображения распределений высокочастотных токов на мета-атомах.

Глава 2

Исследование сверхпроводящих спиральных элементов метаматериалов

2.1. Введение.

В разделе 2.2 выполнено теоретическое и экспериментальное исследование электродинамики плоского спирального сверхпроводящего резонатора. Резонатор выполнен в виде монофилярной архимедовой спирали (Рис.2.1б). В программе HFSS построена расчетная модель спирали Архимеда, размещенной между двумя возбуждающими кольцами. Вычислены резонансные частоты. На резонансных частотах вычислены соответствующие неоднородные распределения ВЧ токов f(R), где R координата вдоль радиуса спирали. Показано, что резонансные частоты и распределения тока хорошо описываются простыми соотношениями $\mathrm{fn} = f1 * n$ и $\mathrm{f(R)} = \sin(\pi * n * (\mathrm{R}/\mathrm{Re})^2)$, где $n = 1; 2 \ldots$, а Re - внешний радиус спирали. Наш анализ электродинамических свойств спиральных резонаторов находится в хорошем согласии с аналитическим расчетом и измерениями, выполненным с использованием специально разработанного магнитного зонда и лазерного сканирующего микроскопа.

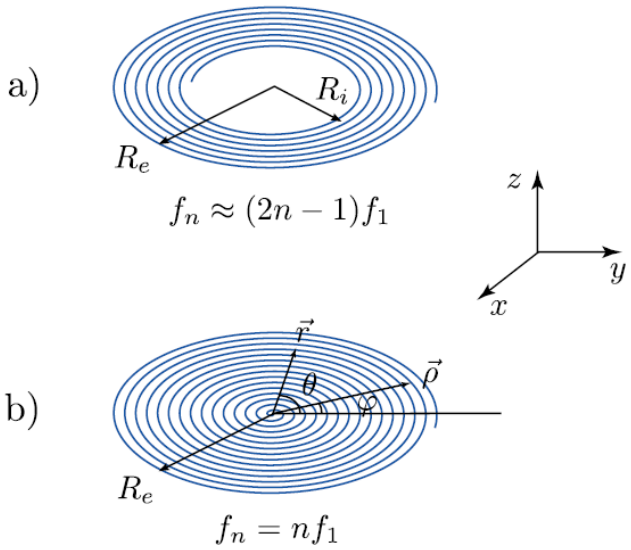


Рис. 2.1. (а) Эскиз монофилярного планарного кольцевого спирального резонатора (SR3). Здесь Re – внешний радиус, а Ri<Re – внутренний радиус спирали. (б) Эскиз монофилярного планарного архимедова спирального резонатора (SR2). Здесь Re - внешний радиус спирали.

В разделе 2.3 выполнены исследования электромагнитного резонатора, выполненного в виде монофилярного архимедова спирального резонатора, сформированного в виде кольца, без центральной части (Рис. 2.1а). Плоские спиральные резонаторы интересны как компоненты метаматериалов благодаря их компактным суб-волновым размерам. Такие резонаторы связываются в основном с компонентой магнитного поля, падающей электромагнитной волны. Относительные частоты резонансных мод следуют последовательности нечетных чисел как f1: f2: f3: f4 ... =1: 3: 5: 7 ..., несмотря на почти одинаковые граничные условия для электромагнитных полей на концах резонатора. Численно рассчитанные резонансные частоты и распределения тока находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и результатами аналитической модели. Используя низкотемпературную лазерную сканирующую микроскопию сверхпроводящего спирального резонатора, мы сравниваем

экспериментальные визуализированные распределения переменного тока на спирали с расчетными. Теория и эксперимент хорошо согласуются друг с другом.

2.2. Спиральный резонатор на спирали Архимеда.

2.2.1. Численный расчет спирали Архимеда.

На первом этапе выполнен численный расчет двух типов спиралей Архимеда они имеют маркировку: SR1 и SR2. Расчет собственных резонансных частот и распределений токов на них для спиралей Архимеда выполнен в программе ANSYS HFSS [22].

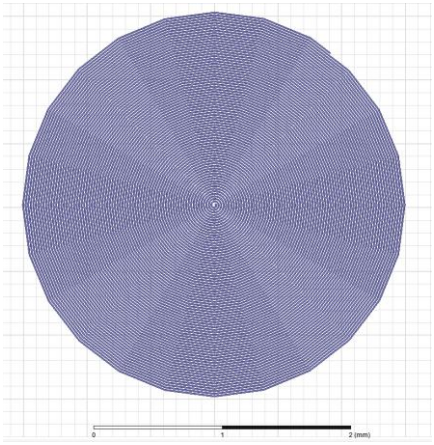


Рис. 2.2. Модель спирали Архимеда, построенная в HFSS. Параметры образца SR2: внешний диаметр D=3 мм, ширина линии w=10 мкм, ширина зазора между витками s=10 мкм количество витков N=75. Спираль изготовлена на кремниевой подложке с диэлектрической проницаемостью e_r=11.9 и толщиной d=0.35 мм.

Топология спирального резонатора SR2, созданная в HFSS, представлена на рисунке 2.2. Общий вид расчетной модели показан на рисунке 2.3. Спираль (синий цвет) расположена в центре расчетной модели

на подложке (оранжевый цвет) с диэлектрической проницаемостью e_r=11.9. Два возбуждающих кольца (красный цвет) расположены с противоположных сторон подложки. Все объекты размещены внутри параллелепипеда (светло синий цвет) с диэлектрической проницаемостью e_r=1.

В расчетной модели HFSS рассматривается плоская спираль, проводники которые изготовлены из бесконечно тонкого слоя без потерь, расположенного на поверхности подложки с диэлектрической проницаемостью ε_r. В расчетной модели каждый виток спирали состоит из 24 прямых сегментов. На поверхности спирали задано граничное условие с конечной проводимостью (FiniteConductivity). Была выбрана высокая проводимость $c=10^{30}$ *См/м* для того чтобы промоделировать спираль в сверхпроводящем состоянии. На поверхности спирали было задано ограничение на размер расчетной сетки *l=100 мкм*.

Образец спирального резонатора расположен между двумя возбуждающими петлями, расстояние между которыми равно четырем радиусам петли *H=4R* чтобы обеспечить слабую связь двух петель. Возбуждающие петли в расчетной модели выполнены в виде бесконечно тонких колец, с проводимостью $c=10^{8}$ *См/м*.

В модели HFSS два возбуждающих порта вставлены в разрывы магнитных колец для измерения коэффициентов передачи S21 между портом 1 и портом 2 (рис. 2.4а). В данной расчетной модели источником возбуждающего СВЧ сигнала (портом) является граничное условие типа Lumped port (рис. 2.4б). Порт реализован как двумерный прямоугольник, на поверхность которого присвоено граничное условие Lumped port (зеленым цветом). В порту стрелкой задано направление электрического поля (красным цветом), импеданс порта задан 50 Ом.

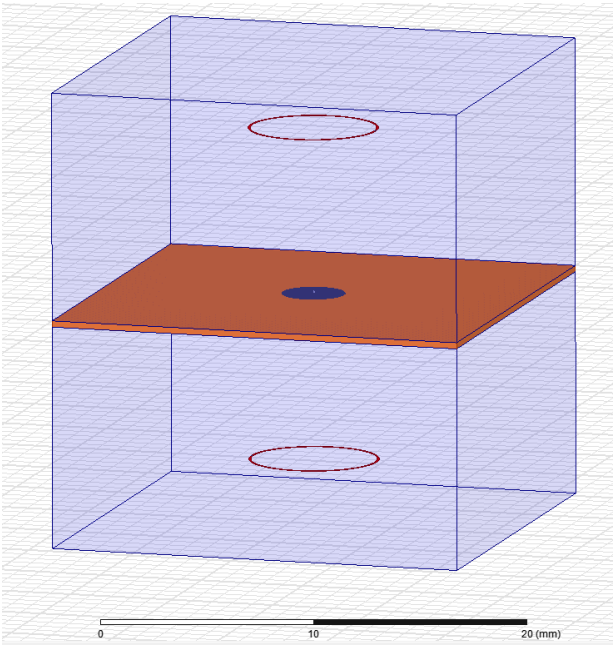


Рис. 2.3. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета спирали Архимеда SR2.

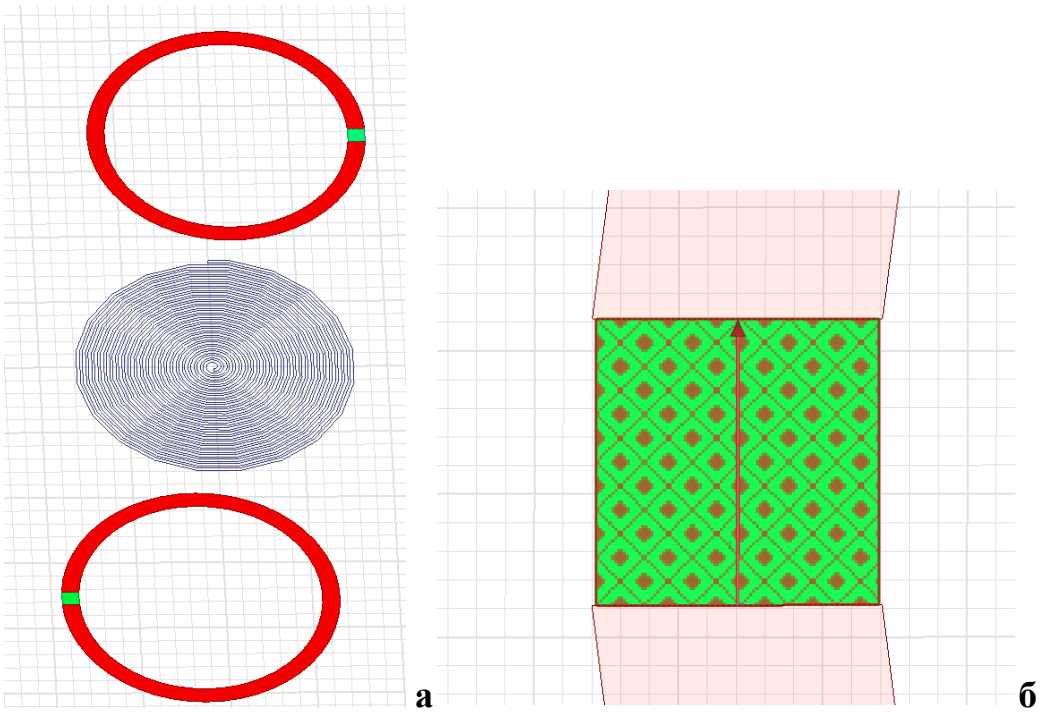


Рис. 2.4. (а) Модель спирального резонатора (показана синим цветом) расположена между двумя возбуждающими кольцами (показаны красным цветом). В разрыв каждого кольца вставлен возбуждающий порт (показан зеленым цветом) (б) Источник возбуждающего СВЧ сигнала (порт) показан зеленым цветом.

После создания расчетной модели были заданы следующие параметры расчета: частота сходимости f=1.7 ГГц; критерий сходимости ds=0.02. Часть спирали с выполненным разбиением сеткой показана на рисунке 2.5. Коэффициент передачи S21 через расчетную модель, рассчитанный в HFSS методом Driven Modal, представлен на рисунке 2.6. На рисунке видна кривая связи между кольцами, которая проходит на уровне от -60 до -52 дБ. На кривой заметны 10 резонансных пиков. Рассчитанные резонансные частоты спирали Архимеда SR2 представлены в таблице 1.

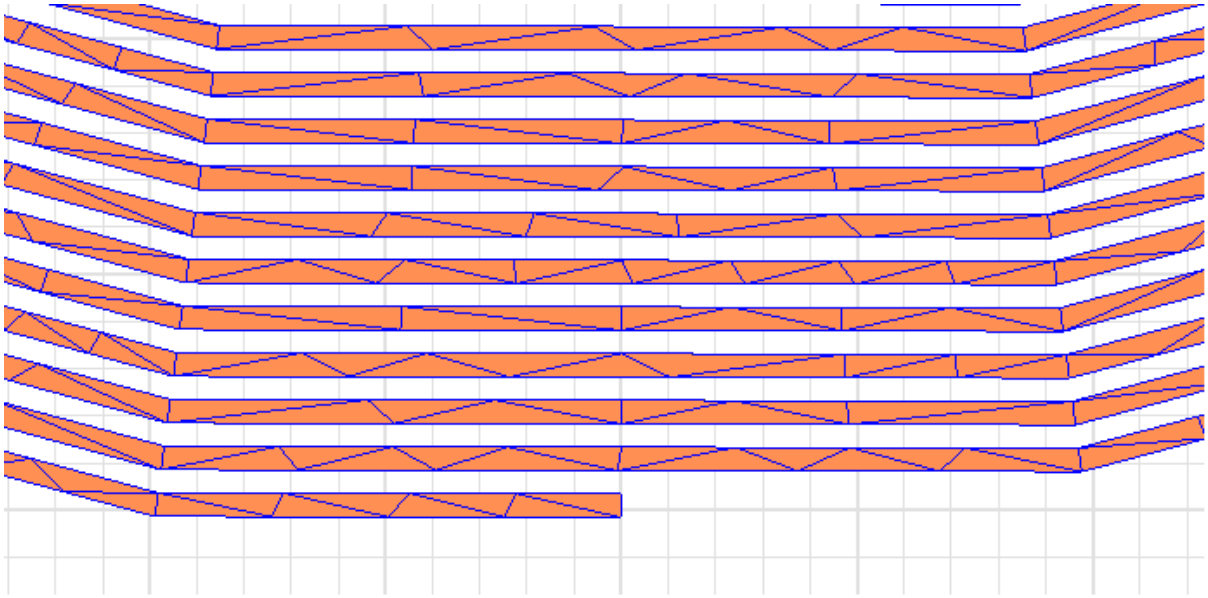


Рис. 2.5. Вид части спирали SR2 в HFSS с выполненным разбиением сеткой.

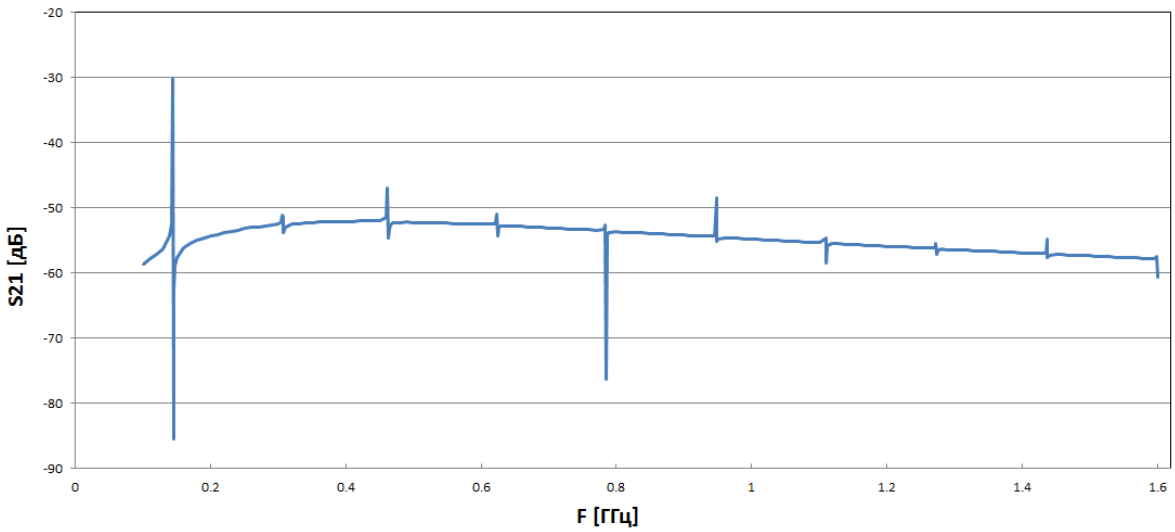


Рис. 2.6. Резонансные частоты резонатора SR2, рассчитанные в HFSS.

Резонансные частоты спирального резонатора в первом приближении можно рассчитать по той же простой формуле, что и частоты обычного полуволнового резонатора:

$$f = \frac{c*N}{2*l*\sqrt{e_r}} \qquad (2.1)$$

В этой формуле c - скорость света в вакууме; $2*l$ - удвоенная длина спирали; N - номер резонанса; e_r- диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится резонатор. В том случае если спираль лежит на границе раздела двух сред: подложки и вакуума над спиралью, то диэлектрическая проницаемость среды вокруг спирали равна среднему арифметическому диэлектрических проницаемостей двух сред:

$$e_r = \frac{e_{\text{вакуума}} + e_{\text{подл}}}{2} \qquad (2.2)$$

У резонатора SR2 диэлектрическая проницаемость подложки $e_{\text{подл}} = 11.9$, поэтому диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится резонатор, рассчитанная по формуле (2.2) $e_r = 6.45$. Резонансные частоты спирали Архимеда SR2, рассчитанные по формуле (2.1) представлены в третьей колонке таблицы 1. В таблице 1 видно, что резонансные частоты

спирали Архимеда, рассчитанные в HFSS и по формуле (2.1) имеют хорошее совпадение.

Таблица 1. Резонансные частоты резонатора SR2, рассчитанные в HFSS и по формуле (2.1).

№	Резонансная частота, рассчитанная в HFSS [МГц]	Резонансная частота, рассчитанная по формуле (2.1) [МГц]
1	144	165
2	306	330
3	462	495
4	623	661
5	784	826
6	948	991
7	1110	1156
8	1273	1321
9	1437	1486
10	1597	1652

На нескольких резонансных частотах были построены распределения поверхностных высокочастотных (ВЧ) токов (рис. 2.7).

Кроме того, были построены двумерные графики зависимостей форм стоячих волн СВЧ токов от координаты вдоль радиуса спирального резонатора SR2 из данных HFSS на нескольких резонансных частотах (рис. 2.12).

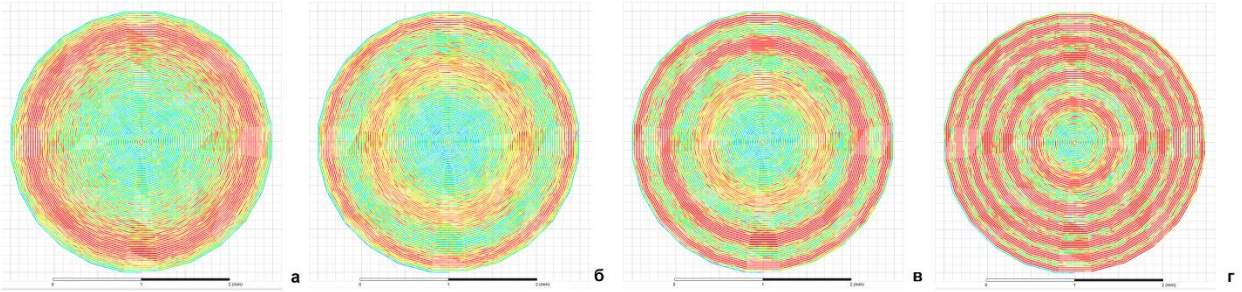


Рис. 2.7. Распределения токов на резонансных частотах резонатора SR2 для первой (а), второй (б), третьей (в) и шестой (г) мод, рассчитанные в HFSS.

Распределения тока на рисунке 2.12 построены на резонансных частотах спирального резонатора методом интегрирования магнитного поля по замкнутому контуру. Кольцевой контур интегрирования сориентирован перпендикулярно виткам спирали, центр контура лежит в плоскости спирали. Ток в проводнике спирали вычислен как линейный интеграл магнитного поля вокруг замкнутой кривой, охватывающей участок проводящей линии спирали. Такой подход дал наилучшую точность в расчете СВЧ-тока, данные извлекались в 1800 точках вдоль спирального резонатора SR2.

Также был выполнен численный расчет спирального резонатора на основе спирали Архимеда SR1 (рис. 2.8). В моделе каждый виток спирали состоит из 20 прямых сегментов. На поверхности спирали было задано ограничение на максимальный размер сетки l=500 мкм. В программе HFSS построена расчетная модель спирали Архимеда, размещенной между двумя возбуждающими кольцами (рис. 2.9). В этом разделе расчетная модель HFSS построена также как и в разделе 2.2.1, только с параметрами спирали SR1.

После создания расчетной модели были заданы следующие параметры расчета: частота сходимости f=1 ГГц; критерий сходимости ds=0.02.

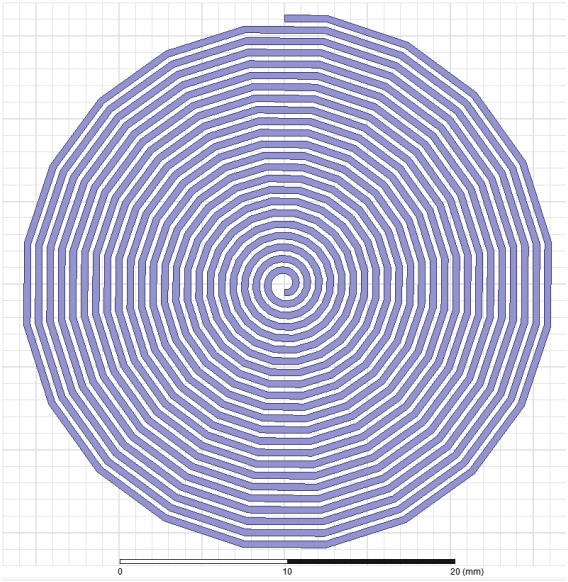


Рис. 2.8. Модель спирали Архимеда SR1, построенная в HFSS. Параметры образца SR1: внешний диаметр D=32.5 мм, ширина линии w=0.4 мм, ширина зазора между витками s=0.3 мм количество витков N=23. Спираль изготовлена на керамической подложке (RO4350B) с диэлектрической проницаемостью e_r=3.48 и толщиной d=0.8 мм.

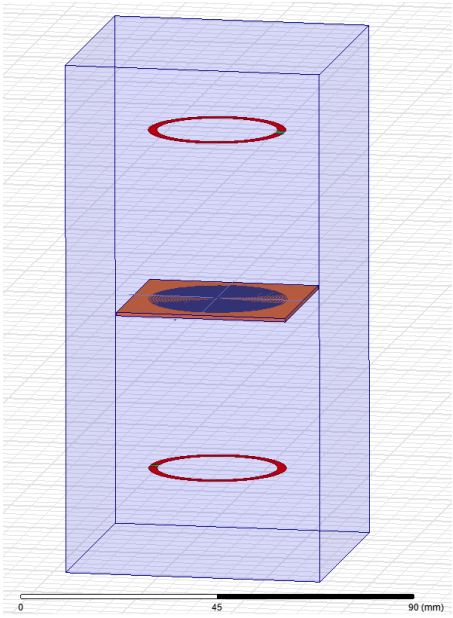


Рис. 2.9. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета спирали Архимеда SR1.

Рассчитанный коэффициент передачи S21 (рис. 2.10) через расчетную модель (рис. 2.9) в зависимости от частоты СВЧ, рассчитанный по алгоритму изложенному выше. На рисунке 2.10 видно, что кривая связи между кольцами проходит на уровне от -70 до -65 дБ. На кривой видны 11 резонансных пиков.

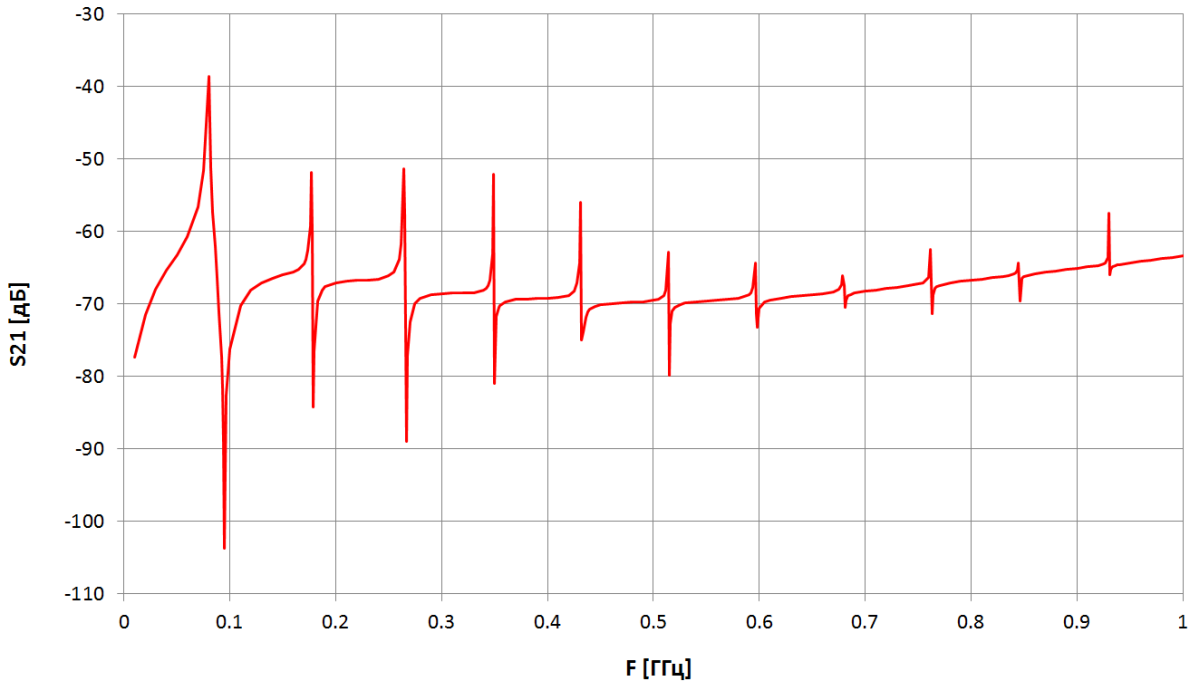


Рис. 2.10. Резонансные частоты резонатора SR1, рассчитанные в HFSS.

У резонатора SR1 диэлектрическая проницаемость подложки $e_{\text{подл}} = 3.48$, поэтому диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится резонатор, рассчитанная по формуле (2.1) $e_r = 2.24$. Резонансные частоты спирали Архимеда SR1, рассчитанные по формуле (2.1) представлены в третьей колонке таблицы 2. В таблице 2 видно, что резонансные частоты спирали Архимеда, рассчитанные в HFSS и по формуле (2.1) имеют хорошее совпадение.

Таблица 2. Резонансные частоты резонатора SR1, рассчитанные в HFSS и по формуле (2.1).

№	Резонансная частота, рассчитанная в HFSS [МГц]	Резонансная частота, рассчитанная по формуле (2.1) [МГц]
1	80	85
2	177	170
3	264	255
4	349	340
5	431	425
6	514	510
7	596	595
8	679	680
9	762	765
10	845	850

2.2.2. Экспериментальная проверка численного расчета.

В разделе 2.2.2 выполнено экспериментальное исследование спирального резонатора на спирали Архимеда в измерительной схеме, показанной на рисунке 7. Спиральный резонатор SR2 изготовлен из Nb на кремниевой подложке. Затем образец был смонтирован внутри медного держателя образца между двумя возбуждающими кольцами, присоединенными к коаксиальным кабелям. Держатель образца установлен внутри криостата и подключен к векторному анализатору цепей (ВАЦ) Rohde&Schwartz ZVB20 [24] коаксиальными кабелями. Измерялся коэффициент передачи S21 между двумя портами ВАЦ, когда образец находился при температуре T=4.2 K.

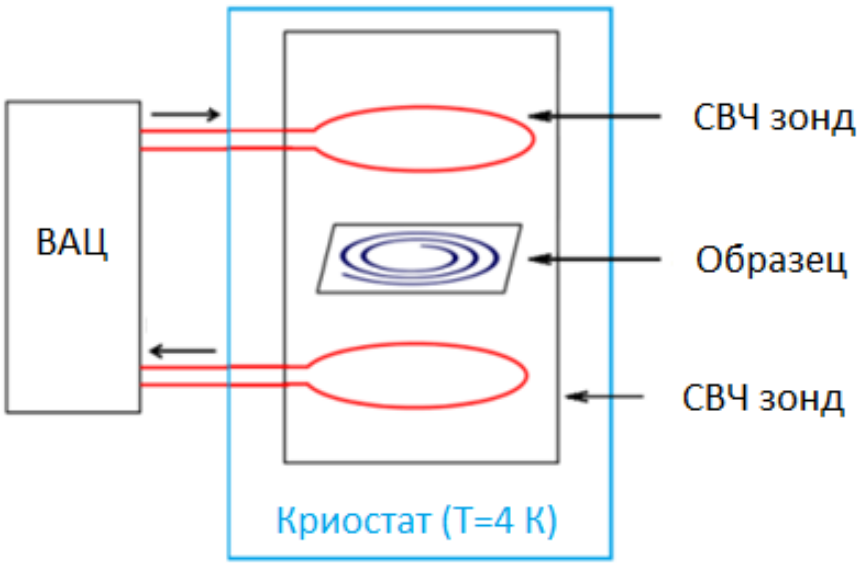


Рис. 2.11. Схема эксперимента для измерения резонансных частот спиральных резонаторов. Образец резонатора установлен между двух магнитных петель, которые подключены к векторному анализатору цепей (ВАЦ) коаксиальными кабелями. Измерения производились в криостате при температуре T=4.2 K.

Результаты экспериментов и расчетов в HFSS для резонаторов SR1 и SR2 представлены в таблице 3.

Резонансные частоты образца SR1, вычисленные в HFSS находятся в идеальном согласии с экспериментом, оставаясь в пределах 1% относительного отклонения для первых 10 резонансных частот (таблица 3, столбец 3).

Резонансные частоты образца SR2, вычисленные в HFSS находятся в хорошем согласии с экспериментом, оставаясь в пределах 3% относительного отклонения для первых 10 резонансных частот за исключением первой резонансной частоты (таблица 3, столбец 6). Отклонение резонансной частоты первой моды может быть связано с тем, что для более низких мод электрическое и магнитное поля распространяются дальше от резонатора, чем для верхних мод. Широко распространенное

радиочастотное поле более низких мод взаимодействуют с окружающими частями экспериментальной установки таким образом, что возмущаются собственные моменты спирального резонатора и смещаются частоты. В то время как, в расчетных моделях HFSS части экспериментальной установки не учитывались.

Таблица 3. Резонансные частоты спиральных резонаторов SR1 и SR2, полученные экспериментально, рассчитанные в HFSS и аналитически.

	Спиральный резонатор SR1			Спиральный резонатор SR2		
№	Эксперимент f_{Exp} [МГц]	HFSS f_{HFSS}/f_{Exp} [МГц]	Аналитика f_{Analit}/f_{Exp}	Эксперимент f_{Exp} [МГц]	HFSS f_{HFSS}/f_{Exp} [МГц]	Аналитика f_{Analit}/f_{Exp}
1	80	1	0.87	128	1.14	1.08
2	180	0.99	0.96	299	1.03	1.15
3	268	0.99	0.92	465	1	1.05
4	353	0.99	0.97	635	0.99	1.07
5	437	0.99	0.97	801	0.99	1.04
6	522	0.99	0.98	971	0.99	1.05
7	607	0.99	0.97	1139	0.98	1.03
8	693	0.99	0.98	1307	0.98	1.04
9	779	0.99	0.97	1475	0.98	1.02
10	866	0.98	0.98	1643	0.98	1.03

На следующем этапе, распределения СВЧ токов были измерены экспериментально для проверки результатов численных расчетов в HFSS. Распределения СВЧ токов на образце были измерены на ЛСМ (рис. 2.12). Установка ЛСМ подробно описана в разделе 1.5. Луч лазера локально нагревает сверхпроводящий образец, повышая концентрацию нормальных электронов (квазичастиц), что приводит к изменению коэффициентов

передачи высокочастотного сигнала через резонатор. Наведенное изменение коэффициентов передачи S21 соответствует квадрату амплитуды локальных ВЧ токов в области, освещаемой лазерным лучом. На установке ЛСМ лазерный луч сканирует сверхпроводящий образец, и строит карту распределения СВЧ токов.

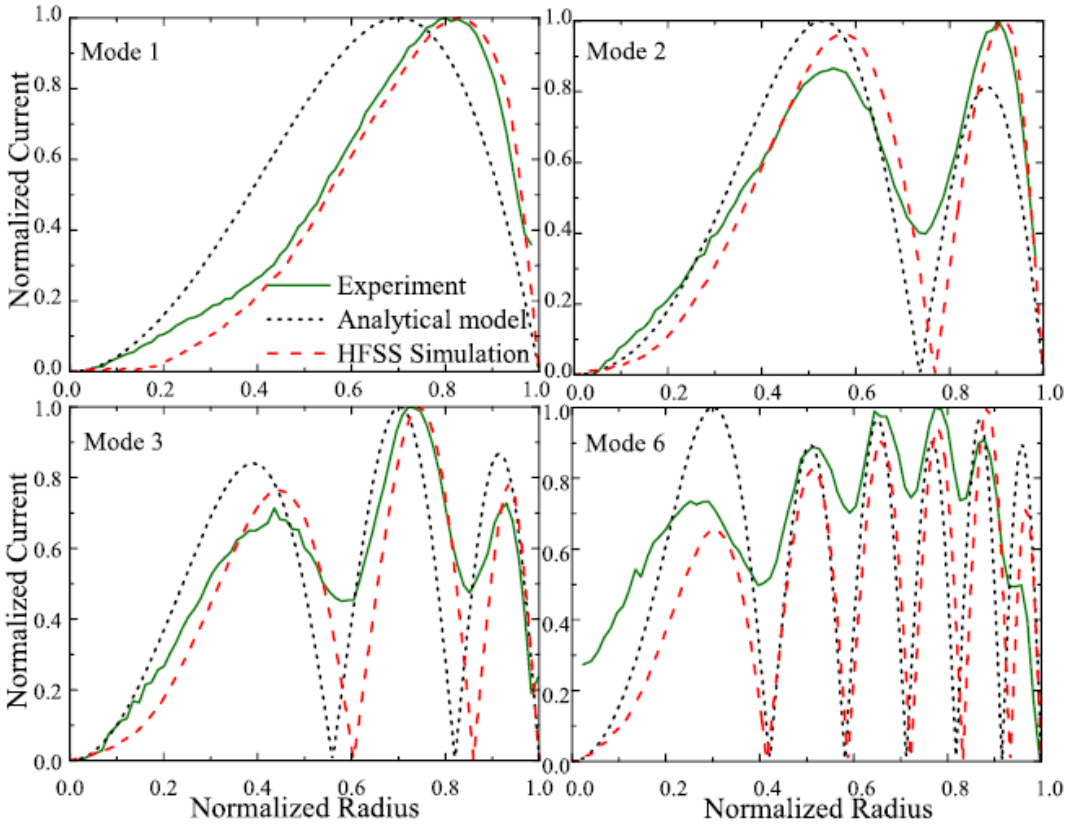


Рис. 2.12. Распределения тока вдоль радиуса спирали Архимеда (SR2), измеренные экспериментально (сплошная линия), рассчитанные численно (пунктирная линия) и аналитически (точечная линия) для первой, второй, третьей и шестой моды. Данные нормированы на длину радиуса спирали по оси X и на максимум амплитуды тока по оси Y. Экспериментальные данные измеренные на LSM сглажены тепловой диссипацией в подложке. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с численным и аналитическим расчетами.

Распределения СВЧ токов на образце спирального резонатора SR2 для четырех мод (n =1; 2; 3; и 6), измеренные экспериментально при помощи

ЛСМ показаны на рисунке 2.12. Для каждой моды, кривые получаются путем объединения измерений вдоль четырех ортогональных радиальных направлений, что позволяет получить данные не зависящие от направления. Мощность лазерного луча равна около 10 нВт (при длине волны 670 нм). Наведенное возмущение является достаточно низким, чтобы существенно не изменить распределение СВЧ тока.

На рисунке 2.12 можно отметить очень хорошее совпадение положений минимумов и максимумов, полученных экспериментально (сплошные линии) и рассчитанных в HFSS (пунктирные линии) на всех модах. Можно обратите внимание, что все экспериментальные профили сглажены и, как результат, измеренный ток не достигает нуля в узлах СВЧ токов. Это можно объяснить эффектом размытия теплового пятна, создаваемого лазерным лучом при освещении Si подложки, на которой расположен Nb резонатор. На рисунке 2.12 количество максимумов тока соответствует номеру резонансной моды. Это подтверждает, что спираль действует как распределенный резонатор с целым числом полуволн СВЧ тока на каждой собственной моде. Форма стоячих волн, полученная из эксперимента, находится в хорошем согласии с симуляцией (рис. 2.12).

2.3. Кольцевой спиральный резонатор.

В этом разделе исследован электромагнитный резонатора, выполненный в виде монофилярного архимедова спирального резонатора, сформированного в виде кольца, без центральной части (кольцевой спиральный резонатор). Плоские спиральные резонаторы интересны как компоненты метаматериалов благодаря их компактным суб-волновым размерам. Такие резонаторы связываются в основном с магнитной компонентой падающей электромагнитной волны. Относительные частоты резонансных мод следуют последовательности нечетных чисел как f1:f2:f3:f4 ... =1:3:5:7..., несмотря на

почти одинаковые граничные условия для электромагнитных полей на концах резонатора.

2.3.1. Численный расчет кольцевого спирального резонатора.

Проведен численный расчет кольцевого спирального резонатора SR3. Расчетная модель резонатора представлена на рисунке 2.15.

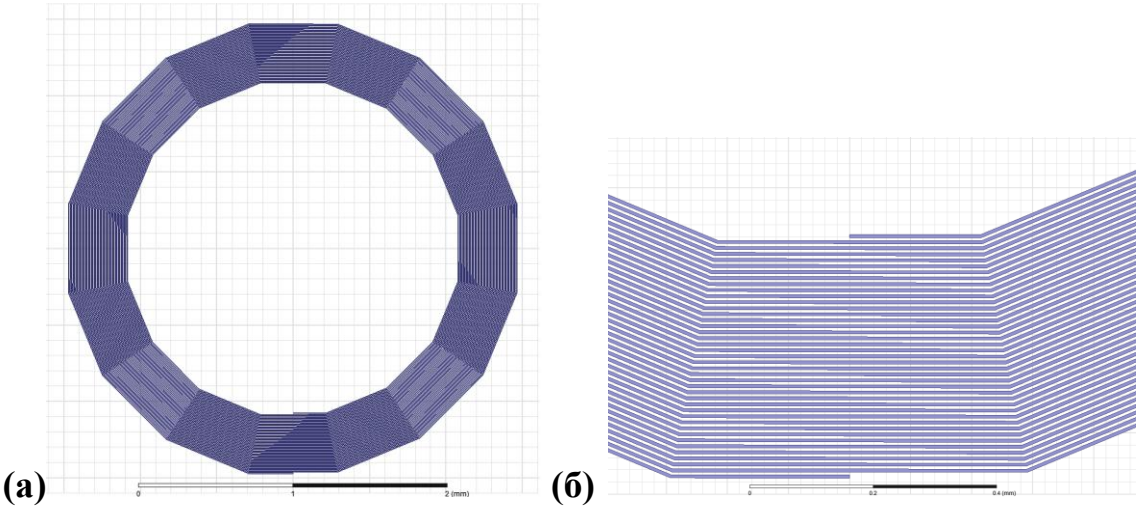


Рис. 2.15. (а) Модель кольцевого спирального резонатора (SR3), построенная в HFSS. Параметры образца SR3: внешний диаметр De=3 мм, внутренний диаметр Di=2.2 мм, ширина линии спирали w=5 мкм, ширина зазора между витками s=5 мкм, количество витков N=40. Спираль изготовлена на кварцевой подложке с диэлектрической проницаемостью e_r=4.5 и толщиной d=0.35 мм. (б) Увеличенная нижняя часть спирали.

Проведено численное электромагнитное моделирование кольцевого спирального резонатора SR3 в программе ANSYS HFSS DrivenModal. Расчетная модель представлена на рисунке 2.16. В расчетной модели спираль размещена на подложке, над спиралью находится вакуум. В расчетной модели HFSS предполагаются плоская спираль, которые изготовлены из

бесконечно тонкого слоя без потерь, расположенного на поверхности подложки с соответствующей диэлектрической проницаемостью ε_r. В расчетной модели каждый виток спирали состоит из 16 прямых сегментов. Для того чтобы промоделировать спираль в сверхпроводящем состоянии на поверхности спирали был присвоен проводящий материал с высокой проводимостью. Это было реализовано при помощи граничного условия FiniteConductivity, проводимость которого c=10^{30} См/м. На поверхности спирали было задано ограничение на размер сетки l=100 мкм. Образец спирального резонатора расположен между двумя слабо связанными магнитными петлями. Расстояние между петлями равно четырем радиусам петли (4Re) для того чтобы обеспечить слабую связь двух петель. Петли присоединены к коаксиальным кабелям. В расчетной модели магнитные петли выполнены в виде коаксиальных колец, на которых была задана проводимость C=10^{8} См/м. На торцы коаксиальных кабелей присвоены источники возбуждения waveport (рис. 2.16).

Рассчитанный коэффициент передачи S21 через расчетную модель в зависимости от частоты ВЧ сигнала показан на рисунке 2.17. Резонансные частоты, рассчитанные методом DrivenModal, представлены в таблице 4.

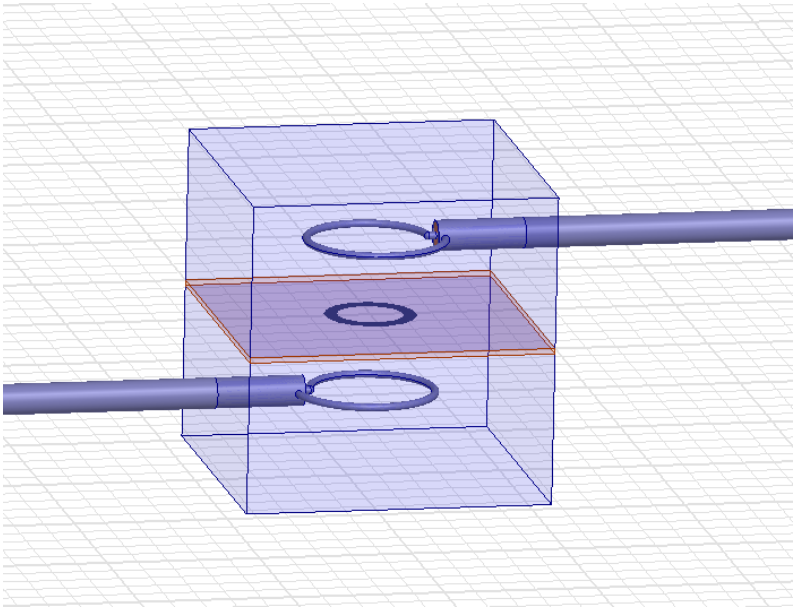


Рис. 2.16. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета кольцевого спирального резонатора (SR3) методом DrivenModal.

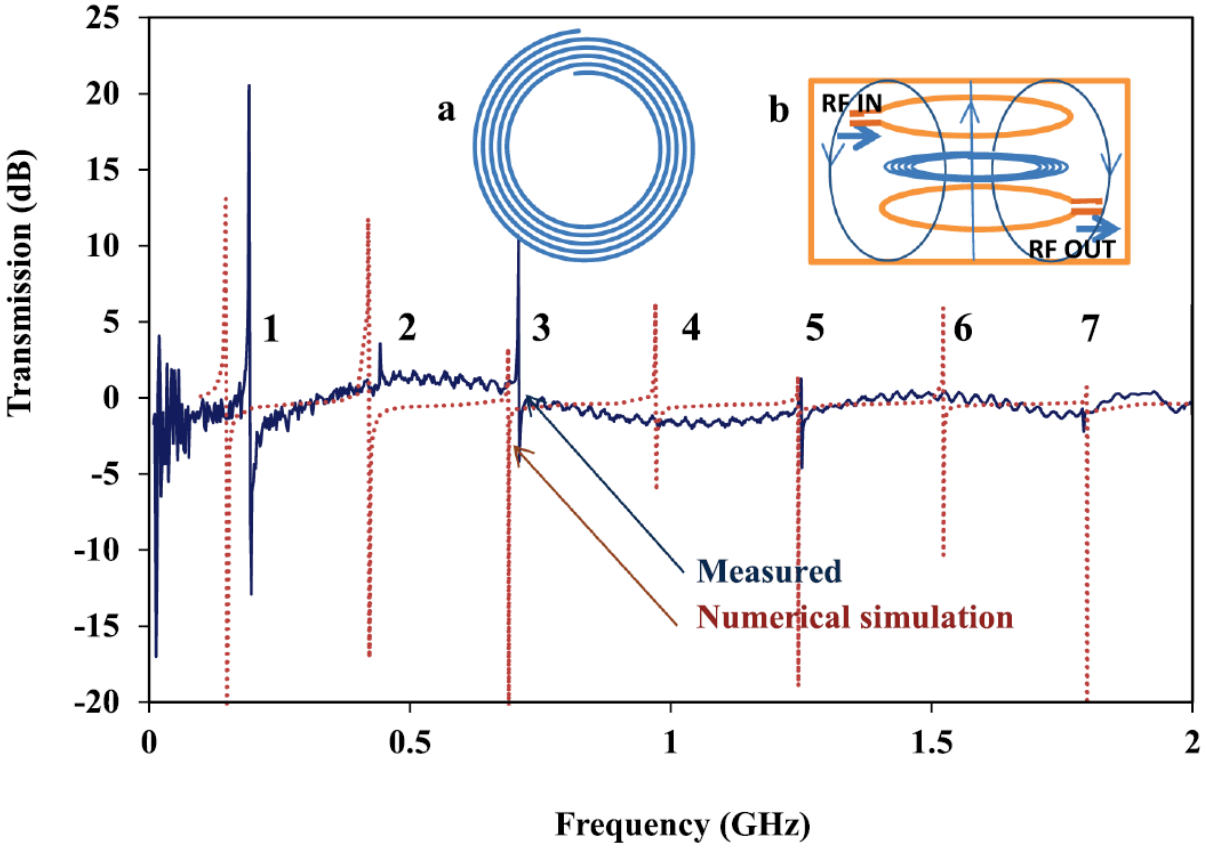


Рис. 2.17. (а) Экспериментальный (сплошная линия) и численно рассчитанный (пунктирная линия) СВЧ отклик кольцевого спирального резонатора (SR3). Числа над пиками обозначают номер резонанса. Резонатор представляет собой сверхпроводящий 40 витковую Nb спираль с наружным диаметром 3 мм и внутренним диаметром 2.2 мм. (б) Упрощенный вид спирали (с меньшим числом оборотов) показан во врезке.

Таблица 4. Резонансные частоты кольцевого спирального резонатора SR3, рассчитанные в HFSS методом DrivenModal.

№	Резонансная частота, рассчитанная в HFSS методом DrivenModal [МГц]
1	146.3
2	419.1
3	687
4	969.6
5	1244
6	1521
7	1799.5

Проведено численное электромагнитное моделирование кольцевого спирального резонатора SR3 в программе ANSYS HFSS методом Eigenmode. Расчетная модель представлена на рисунке 2.18. В расчетной модели спираль размещена на подложке, над спиралью находится вакуум. На поверхность спирали присвоено граничное условие Finiteconductivity с проводимостью *c=10^30 См/м*. В модели HFSS Eigenmode мы рассматриваем свободно стоящую спираль без колец связи. Режим расчета HFSS Eigenmode предназначен для расчета собственных резонансных частот расчетной модели без внешних источников возбуждения. Резонансные частоты, рассчитанные в HFSS Eigenmode представлены в таблице 5.

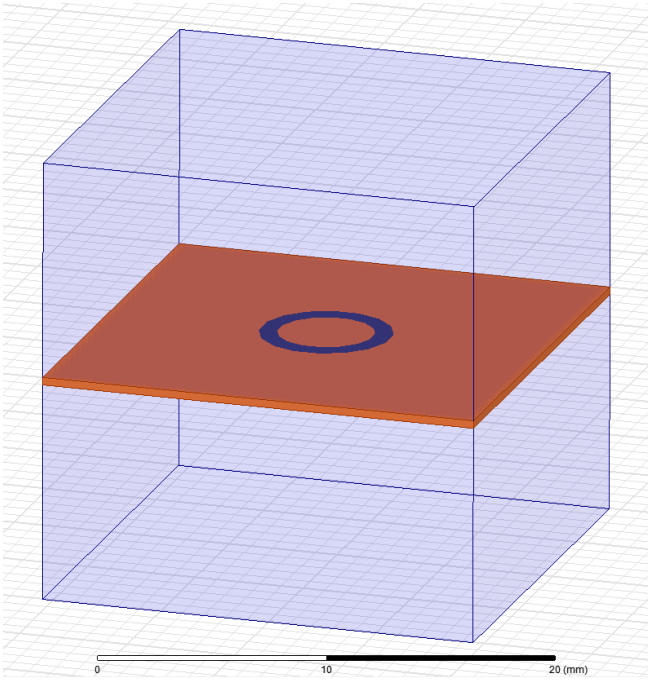


Рис. 2.18. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета кольцевого спирального резонатора методом Eigenmode.

Таблица 5. Резонансные частоты кольцевого спирального резонатора SR3, рассчитанные в HFSS методом Eigenmode.

Номер резонанса	Резонансная частота [МГц]
1	158
2	432
3	696
4	978
5	1248
6	1528
7	1802
8	2080
9	2352
10	2630

2.3.2. Экспериментальная проверка численного расчета.

Сверхпроводящий спиральный резонатор SR3 изготовлен из Nb на подложке из кристаллического кварца с диэлектрической проницаемостью $e_r = 4.5$. Известно, что эффективная диэлектрическая проницаемость структуры, размещенной на границе раздела диэлектрика и воздуха примерно равна $e_{эфф} = (e_r + 1)/2$. В нашем эксперименте эффективная диэлектрическая проницаемость $e_{эфф} = 2.75$. Измерение резонансных частот резонатора SR3 производилось на экспериментальной установке, схема которой показана на рисунке 2.11. Результаты эксперимента и численного расчета в HFSS представлены на рисунке 2.17.

Экспериментальные резонансные частоты на рисунке 2.17 получены путем измерения коэффициента передачи $|S_{21}|$, через схему. Измеренная зависимость коэффициента передачи от частоты нормирована на данные, измеренные при температуре T=10 K (выше критической температуры Nb). Расчетная кривая $|S_{21}|$, получается как разница между данными рассчитанными, когда спираль идеальный проводник и для материала с потерями. Сверхпроводящий спиральный резонатор был размещен между двумя петлями, слабо связанными друг с другом. Отношение резонансных частот кольцевого спирального резонатора хорошо следует соотношению нечетных чисел: f1: f2: f3: f4 ... =1: 3: 5: 7 ... Амплитуда пиков падает с ростом номера резонансного пика, а четные пики обычно слабее, чем нечетные. Кривая численно рассчитанная в HFSS (пунктирная линия) находится в достаточно хорошем согласии с экспериментальной кривой.

В таблице 6 представлены резонансные частоты, полученные экспериментально, и рассчитанные численно в HFSS двумя методами: DrivenModal и Eigenmode. Все резонансные частоты, кроме первой, рассчитанные в HFSS методом DrivenModal совпали с экспериментом с точностью выше чем 5%. Все резонансные частоты, кроме первой, рассчитанные в HFSS методом Eigenmode совпали с экспериментом с

точностью выше чем 2%. Мы считаем, что это отклонение первой резонансной частоты связанно с сильной связью резонатора на первой моде с возбуждающими кольцами экспериментальной установки. Сила магнитной связи различна для разных мод из-за различного распределения СВЧ магнитного поля вокруг спирали. Более сильная связь с резонатором приводит к большему реактивному сопротивлению соединения элементов, вызывающих смещение частоты резонатора.

Таблица 6. Сравнение резонансных частот кольцевого спирального резонатора SR3, рассчитанных в HFSS методами DrivenModal и Eigenmode с экспериментом и с аналитическим расчетом.

	Резонансная частота				Соотношения частот		
№	Эксперимент [МГц]	HFSS, метод DrivenModal [МГц]	HFSS, метод Eigenmode [МГц]	Аналитика [МГц]	$f_{эксп}/f_{HFSS}$ DM	$f_{эксп}/f_{HFSS}$ EM	$f_{эксп}/f_{analit}$
1	192.3	146.3	158	145	1.314	1.217	1.326
2	442.1	419.1	432	424	1.055	1.023	1.043
3	706.7	687	696	692	1.029	1.015	1.021
4	964.7	969.6	978	973	0.995	0.986	0.991
5	1250.6	1244	1248	1246	1.005	1.002	1.004
6	1521.8	1521	1528	-	1.001	0.996	-
7	1791.3	1799.5	1802	-	0.995	0.994	-

Примечательно, что соотношения резонансных частот, полученные экспериментально и численно, близко следуют последовательности нечетных чисел f1:f2:f3...=1:3:5...

2.4. Заключение

В этой главе представлены численные расчеты и экспериментальная проверка спектров резонансных частот и распределений токов собственных мод планарных резонаторов на спирали Архимеда и кольцевых спиральных резонаторов.

Резонансные частоты спирали Архимеда рассчитаны численно в программе HFSS методом конечных элементов. Собственные частоты резонатора на спирали Архимеда зависят от длины спиральной линии и соотносятся как числа натурального ряда, в пропорции: 1:2:3... Набор резонансных частот спирали Архимеда подобен резонансам прямолинейного резонатора с открытыми концами. Получены зависимости амплитуд токов от радиуса спирального резонатора на резонансных частотах. Результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них хорошо совпадают с аналитическими расчетами и экспериментом.

Проведено исследование кольцевого спирального резонатора. Проведен численный расчет методом конечных элементов модели кольцевой спирали в программе HFSS. Резонансные частоты спирали вычислены в программе HFSS двумя методами: Driven modal и Eigenmode. Показано, что резонансные частоты кольцевого спирального резонатора соотносятся как числа в ряду нечетных чисел: 1:3:5:7... Численно рассчитанные резонансные частоты хорошо совпадают с экспериментом и аналитическим расчетом. При этом в аналитическом расчете сделано приближение, что резонатор имеет нулевую ширину.

Интересно отметить, что собственные частоты резонатора на спирали Архимеда следуют такому же соотношению что и частоты идеального полуволнового резонатора (1:2:3...). А собственные частоты кольцевого спирального резонатора следуют тому же соотношению что и частоты идеального четвертьволнового резонатора (1:3:5:7...). Поэтому, резонатор в

виде спирали Архимеда и кольцевой спиральный резонатор, которые исследованы в данной работе, являются двумя предельными случаями.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение спектров резонаторов, которые занимают промежуточное положение между кольцевым спиральным резонатором и резонатором на спирали Архимеда. После публикации наших работ [А3, А5] были проведены численные расчеты спиральных резонаторов с промежуточной геометрией между кольцевым спиральным резонатором и резонатором на спирали Архимеда [73]. Вместе с тем, вопрос о физической природе граничных условий в кольцевом спиральном резонаторе нуждается в дополнительном исследовании.

Глава 3

Ультракомпактный магнитный мета-атом на основе двойной спирали

3.1. Введение.

Резонатор на двойной спирали показан на рисунке 4.1. В разделе 4.2 описана практическая конструкция сверхкомпактного двух-спирального сверхпроводящего Nb микро-резонатора в качестве потенциального магнитного элемента высокочастотного метаматериала. Этот резонатор состоит из двух сверхпроводящих Nb спиралей, размещенных лицом к лицу, с небольшим зазором, заполненным диэлектриком. Мы изучаем спектральный отклик резонатора и его внутренние моды, используя численное моделирование в HFSS. Изучен спектральный отклик резонатора и структура его внутренних мод, используя численное моделирование в HFSS. В эксперименте с лазерным сканирующим микроскопом (ЛСМ) мы подтверждаем предсказания резонансных частот Nb сверхпроводящего резонатора и структуру его внутренних мод. Достигнутый размер резонатора относительно длины волны на фундаментальной резонансной частоте в нашем эксперименте около $\lambda/4200$. Малый размер и простота изготовления делают двух-спиральный резонатор привлекательным решением для сверхпроводящих фильтров, схем связи и в качестве магнитного компонента метаматериалов.

В разделе 4.3 описан практический дизайн ультра-компактного сверхпроводящего микро-резонатора в интегральном исполнении в качестве потенциального магнитного элемента метаматериала. Достигнутый размер резонатора относительно длины волны на фундаментальной резонансной частоте в нашем эксперименте составляет около $\lambda/14400$. Резонатор состоит из двух сверхпроводящих спиралей Nb, расположенных между собой, с небольшим зазором, заполненным диэлектриком. Спирали закручены в

противоположных направлениях: одна по часовой стрелке, другая против часовой стрелки. Мы изучаем спектральный отклик резонатора и его внутренние моды с использованием численного моделирования в программе HFSS. В эксперименте с лазерным сканирующим микроскопом (LSM) мы подтверждаем предсказания резонансных частот сверхпроводящего резонатора Nb и структуру его внутренних мод. Малый размер и простота изготовления делают двух-спиральный резонатор привлекательным решением для сверхпроводящих фильтров, схем связи и в качестве магнитного компонента метаматериала.

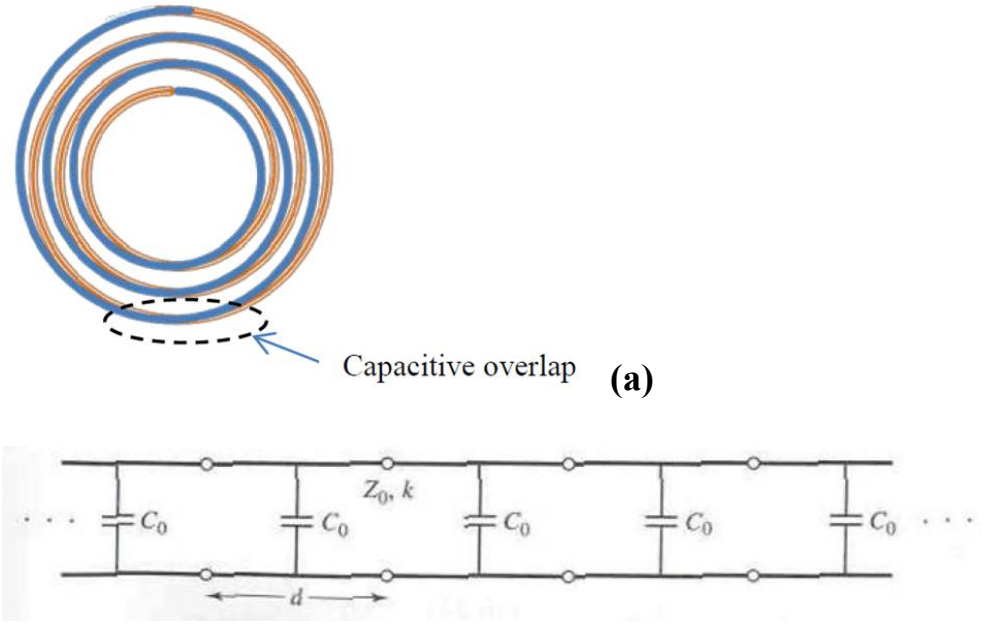


Рис. 3.1. (а) Эскиз резонатора на двойной спирали. Две плоские архимедовы спирали сложены вместе и разделены тонким диэлектрическим слоем. Спирали идентичны по форме и закручены в противоположных направлениях: одна по часовой стрелке, другая против часовой стрелки. Обе спирали имеют форму кольца, без центральной части. Витки спиралей пересекаются в двух секциях, образуя межслойные конденсаторы, когда другие секции спирали обладают большой индуктивностью, как в свободно стоящей спирали. Чередование индуктивных и емкостных участков образует периодическую структуру. (б) Эквивалентная схема резонатора на двойной спирали.

3.2. Сверхпроводящий резонатор на двойной спирали.

В этом разделе описана практическая конструкция сверхкомпактного двух-спирального сверхпроводящего Nb микро-резонатора в качестве потенциального магнитного элемента высокочастотного метаматериала. Этот резонатор состоит из двух сверхпроводящих Nb спиралей, размещенных лицом к лицу, с небольшим зазором, заполненным диэлектриком. Мы изучаем спектральный отклик резонатора и его внутренние моды, используя численное моделирование в HFSS.

3.2.1. Численный расчет сверхпроводящего резонатора на двойной спирали.

Сначала был выполнен численный расчет резонатора на двойной спирали. Расчетная модель резонатора SR4, созданная в HFSS представлена на рисунке 3.2. Общий вид расчетной модели, построенной в HFSS, представлен на рисунке 3.3. В расчетной модели HFSS резонатор размещался между двумя возбуждающими кольцами (рис. 3.3).

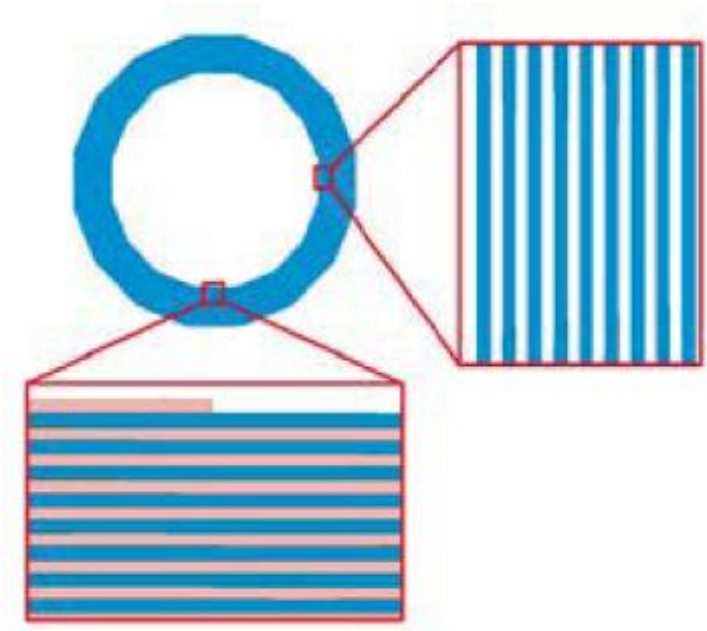


Рис. 3.2. Модель резонатора на двойной спирали (SR4), построенная в HFSS. Параметры образца SR4: внешний диаметр De=6 мм, внутренний диаметр Di=4.4 мм, ширина линии спирали w=10 мкм, ширина зазора между витками s=10 мкм, количество витков N=40. Спирали разделены слоем диэлектрика z_g=18 мкм с диэлектрической проницаемостью e_d=2.5. Резонатор расположен на кварцевой подложке с диэлектрической проницаемостью e_s=4.5 и толщиной d=0.35 мм.

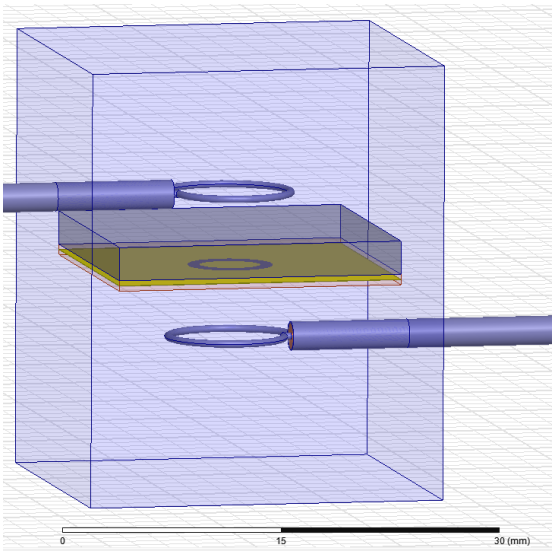


Рис. 3.3. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета резонатора на двойной спирали (SR4).

Рассчитанная зависимость коэффициента передачи S21 от частоты СВЧ сигнала показана на рисунке 3.4. На рисунке 3.4 видны 11 рассчитанных резонансных пиков.

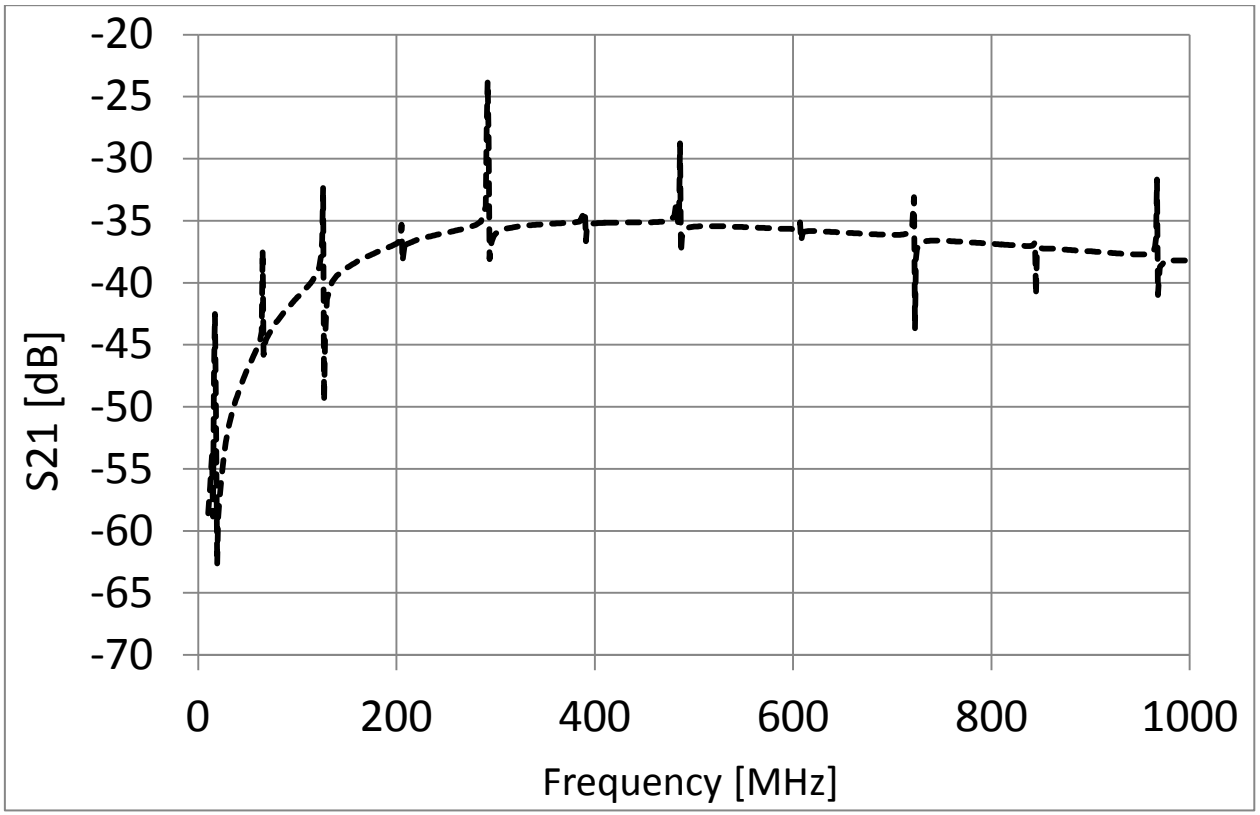
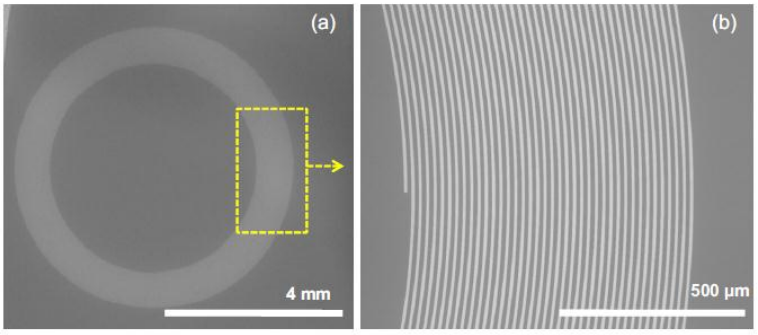


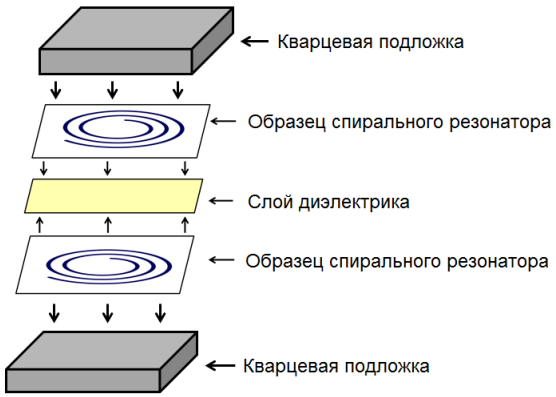
Рис. 3.4 Коэффициент передачи |S21| (пунктирная линия), рассчитанный в HFSS, для расчетной модели, показанной на рисунке 3.3.

3.2.2. Экспериментальная проверка численного расчета.

В этом разделе выполнено экспериментальное исследование образца двойной спирали SR4. Фотография изготовленного одиночного спирального резонатора Nb представлена на рисунке 3.5а. Образец двойной спирали был собран следующим образом: два таких чипа были сложены лицом к лицу и разделены слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью e_d=2.5 (рис. 3.5б).



(а)



(б)

Рис. 3.5. (а) Фотография спирального резонатора, изготовленного из пленки Nb на кварцевой подложке. (б) схема сборки двух-спирального резонатора.

Экспериментальное измерение резонатора проводилось в схеме, показанной на рисунке 3.6 при температуре T=4.2 K. Образец двойной спирали установлен между двух магнитных петель, которые подключены к векторному анализатору цепей (ВАЦ) коаксиальными кабелями. Образец охлаждался в криостате до температуры T=4.2 K. Измерения производились при помощи ВАЦ.

Экспериментальная и расчетная зависимости коэффициента передачи S21 от частоты представлены на рисунке 3.7. Сравнение эксперимента с расчетом выполнено в таблице 7. Рассчитанные резонансные частоты образца SR4 согласуются с экспериментом с точностью выше 6% (таблица 7).

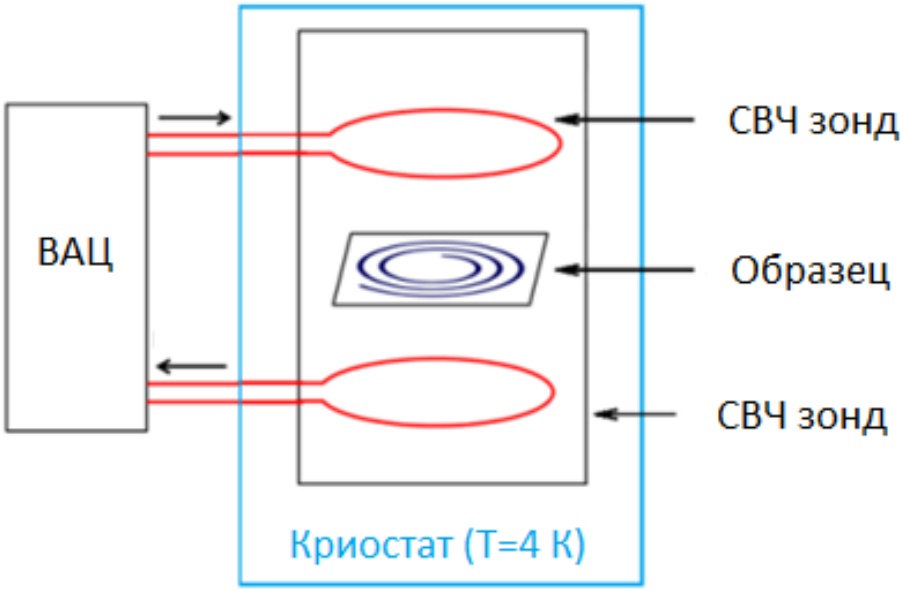


Рис. 3.6. Схема эксперимента для измерения резонансных частот спиральных резонаторов.

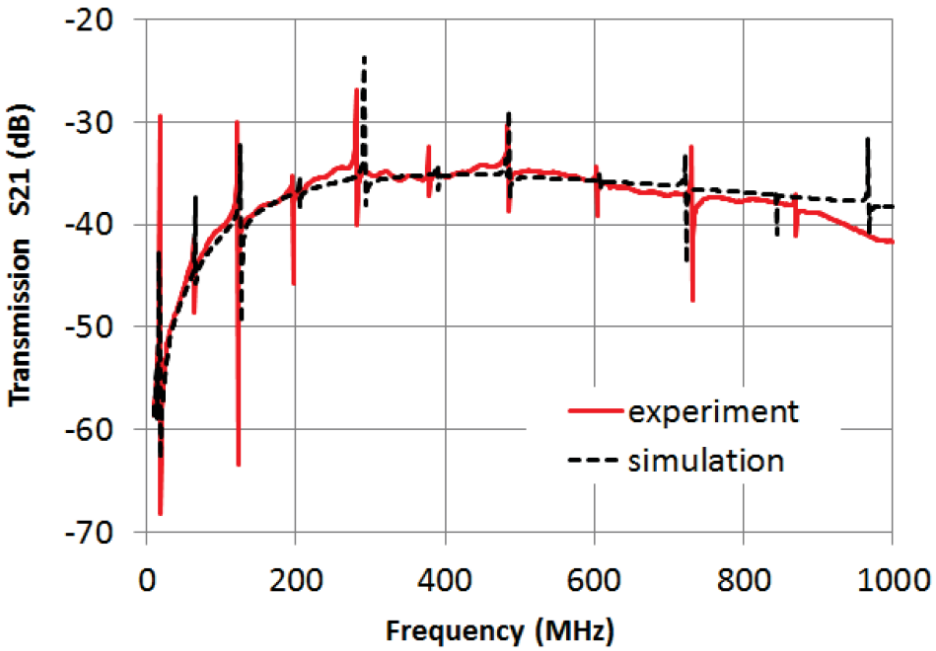


Рис. 3.7. Измеренный коэффициент передачи |S21| через экспериментальную установку (сплошная линия) при T = 4.5 K. Коэффициент передачи |S21| (пунктирная линия) рассчитанный в HFSS. Рассчитанные резонансные частоты образца SR4 согласуются с экспериментом с точностью не хуже чем 6%.

Таблица 7. Резонансные частоты резонатора на двойной спирали (SR4), измеренные экспериментально и рассчитанные в HFSS методом DrivenModal.

№	Резонансные частоты, измеренные экспериментально [МГц]	Резонансные частоты, рассчитанные в HFSS [МГц]	Отношение экспериментального значения к расчетному f_{exp}/f_{HFSS}
1	18	17	1.06
2	64	65	0.98
3	122	126	0.97
4	196	205	0.96
5	281	292	0.96
6	378	389	0.97
7	484	486	1.00
8	603	607	0.99
9	730	722	1.01
10	869	844	1.03

В эксперименте с лазерным сканирующим микроскопом (ЛСМ) мы подтвердили структуру внутренних мод Nb резонатора на двойной спирали SR4 (рис. 3.8). Распределения токов резонатора, измеренные на (ЛСМ) [20] для n = 2, 5 и 9 мод представлены на рисунке 3.8. На рисунке видно, что количество максимумов СВЧ тока соответствует номеру резонанса. Достигнутый размер резонатора относительно длины волны на фундаментальной резонансной частоте в нашем эксперименте около λ/4200.

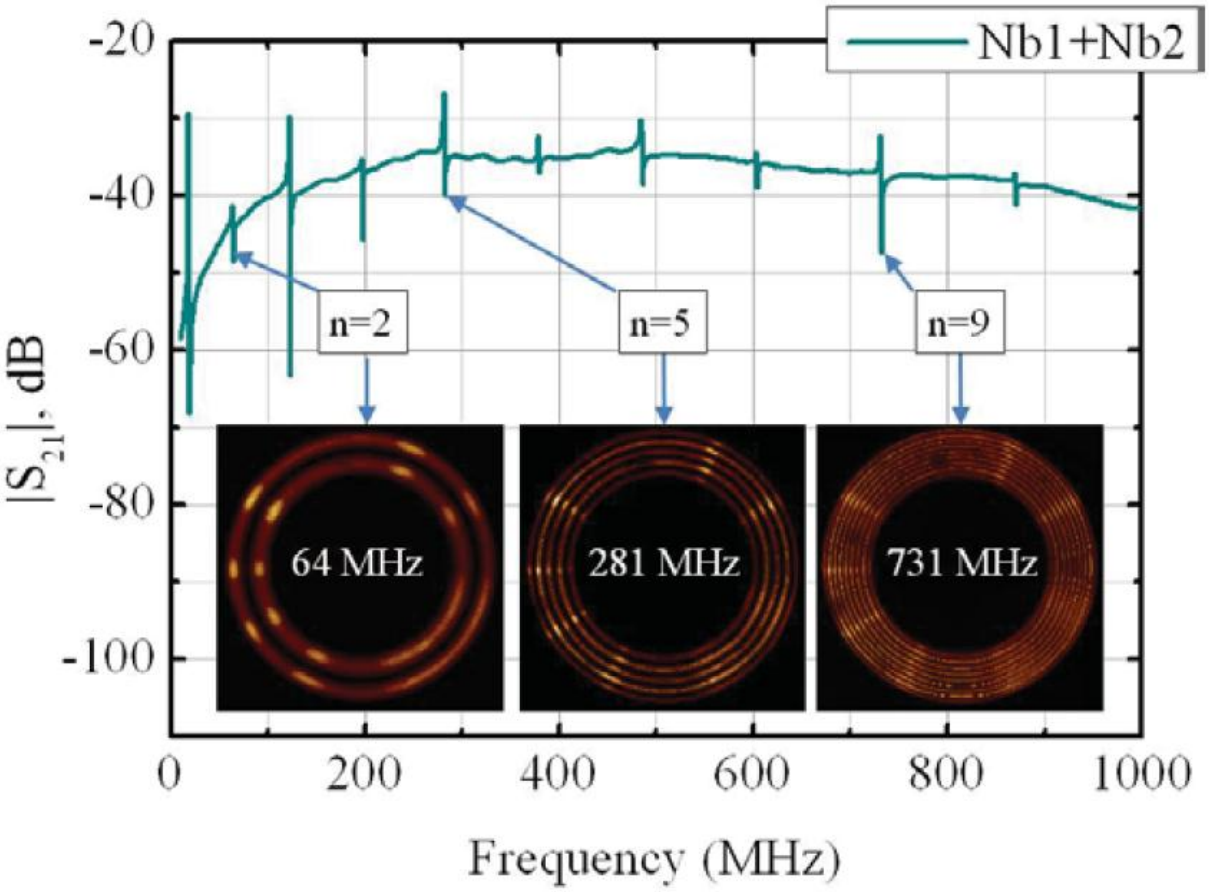


Рис. 3.8 Измеренный | S21 (f) | спектр резонатора SR4 на двойной спирали и распределения тока на резонансных частотах, измеренные на лазерном сканирующем микроскопе (ЛСМ) для n = 2, 5 и 9 мод при мощности входного СВЧ сигнала P_{IN}=-30 дБм.

3.3. Сверхпроводящий резонатор на двойной спирали в интегральном исполнении.

В этой работе мы добиваемся сильного уменьшения размера резонатора, используя две сверхпроводящие спирали Nb, расположенные друг с другом с небольшим промежутком между ними. Две спирали резонатора имеют сильную емкостную связь. В результате частота основной моды снижается более чем в 20 раз по сравнению с одиночным резонатором. Резонатор производится при помощи фотолитографии. Мы показываем, что диаметр

резонатора может занимать лишь малую долю от длины волны на фундаментальной резонансной частоте, менее 1/14400.

3.3.1. Численный расчет сверхпроводящего резонатора на двойной спирали в интегральном исполнении.

На рисунке 3.9 показана расчетная модель двух-спирального резонатора, созданная в HFSS. На верхнем и нижнем участках рисунка витки перекрываются, образуя емкостные элементы, а на правом и левом не перекрываются. Две плоские архимедовы спирали сложены вместе и разделены тонким диэлектрическим слоем. Спирали идентичны по форме и закручены в противоположных направлениях: одна по часовой стрелке, другая против часовой стрелки. Обе спирали имеют форму кольца, без центральной части. Витки спиралей пересекаются в двух секциях, образуя межслойные конденсаторы, когда другие секции спирали обладают большой индуктивностью, как в свободно стоящей спирали. Чередование индуктивных и емкостных участков образует периодическую структуру и приводит к уменьшению скорости распространения сигналов вдоль спиралей.

Чтобы проверить возможность уменьшения основной резонансной частоты в двух спиральном резонаторе по сравнению с одиночной спиралью и для проверки экспериментальных данных, мы использовали программу ANSYS (HFSS) [22]. В расчетах HFSS предполагается, что плоские спирали выполнены из бесконечно тонкого металлического слоя с проводимостью c=10^30 См/м и расположены на кремниевой подложке с диэлектрической проницаемостью ε_r=11.9. Общий вид расчетной модели представлен на рисунке 3.10.

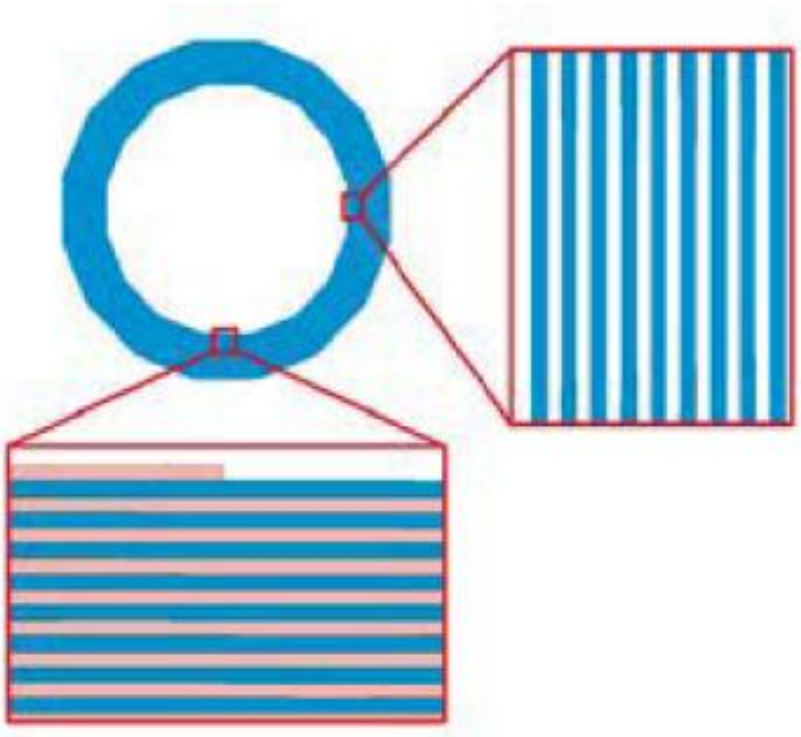


Рис. 3.9. Модель резонатора на двойной спирали в интегральном исполнении (SR5), построенная в HFSS. Параметры образца SR5: внешний диаметр De=3 мм, внутренний диаметр Di=2.2 мм, ширина линии спирали w=5 мкм, ширина зазора между витками s=5 мкм, количество витков N=40. Спирали разделены между собой слоем SiO_2 толщиной 300 нм. Образец расположен на кремниевой подложке с диэлектрической проницаемостью e_r=11.9 и толщиной d=0.35 мм.

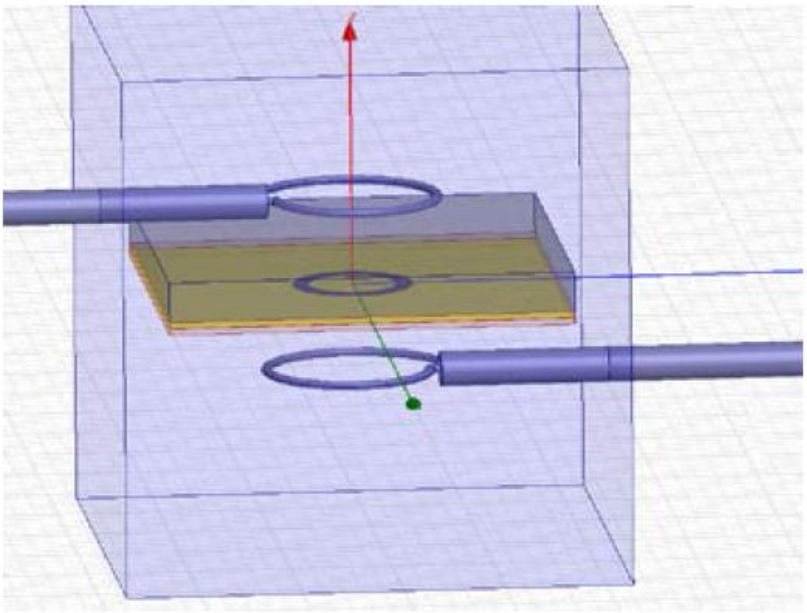


Рис. 3.10. Общий вид модели, построенной в HFSS для расчета резонатора на двойной спирали в интегральном исполнении (SR5).

Численный расчет резонансных частот резонатора в зависимости от толщины диэлектрического слоя выполнен в программе HFSS. Зависимость фундаментальной резонансной частоты двух-спирального резонатора от толщины диэлектрического слоя, разделяющего спирали показана на рисунке 3.11. На рисунке видно, что резонансная частота двух-спирального резонатора растет с увеличение толщины диэлектрического слоя, разделяющего спирали (d), нормированного на ширину витка спирали (w), рассчитанный в HFSS (открытые круги). При этом все остальные размеры образца одинаковы. Для зазора между спиралями более 15 мкм ($d/w>3$) зависимость резонансной частоты от d логарифмическая, а ниже 10 мкм ($d/w<2$) резонансная частота зависит как квадратный корень от расстояния. Измеренная резонансная частота 6.9 МГц хорошо совпадает с рассчитанной в HFSS при расстоянии между спиралями d=300 нм, типичного для толщины диэлектрического слоя в исследуемом образце.

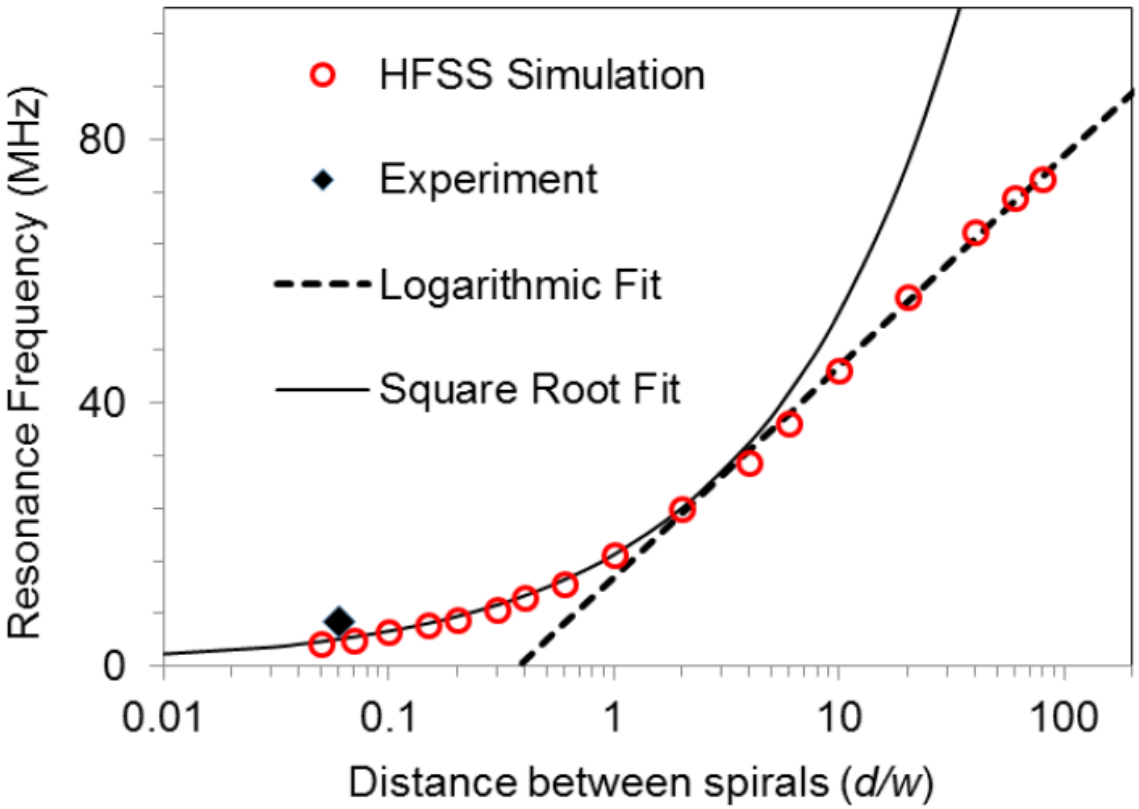


Рис. 3.11. Зависимость фундаментальной резонансной частоты двух-спирального резонатора от толщины диэлектрического слоя, разделяющего спирали (d), нормированного на ширину витка спирали (w), рассчитанная в HFSS (открытые круги). И фиты экспериментальных данных.

3.3.2. Экспериментальная проверка численного расчета.

Эскиз двух-спирального резонатора показан на рисунке 3.12а. Две плоские архимедовы спирали сложены вместе и разделены тонким диэлектрическим слоем. Спирали идентичны по форме и закручены в противоположных направлениях: одна по часовой стрелке, другая против часовой стрелки. Обе спирали имеют форму кольца, без центральной части. Витки спиралей пересекаются в двух секциях, образуя межслойные конденсаторы, когда другие секции спирали обладают большой индуктивностью, как в свободно стоящей спирали (рис. 3.12б). Чередование индуктивных и емкостных участков образует периодическую структуру и

приводит к уменьшению скорости распространения сигналов вдоль спиралей.

Фотография двух-спирального резонатора в интегральном исполнении показана на рисунке 3.12б. Двух-спиральный резонатор изготовлен фотолитографией как трехслойная интегральная схема.

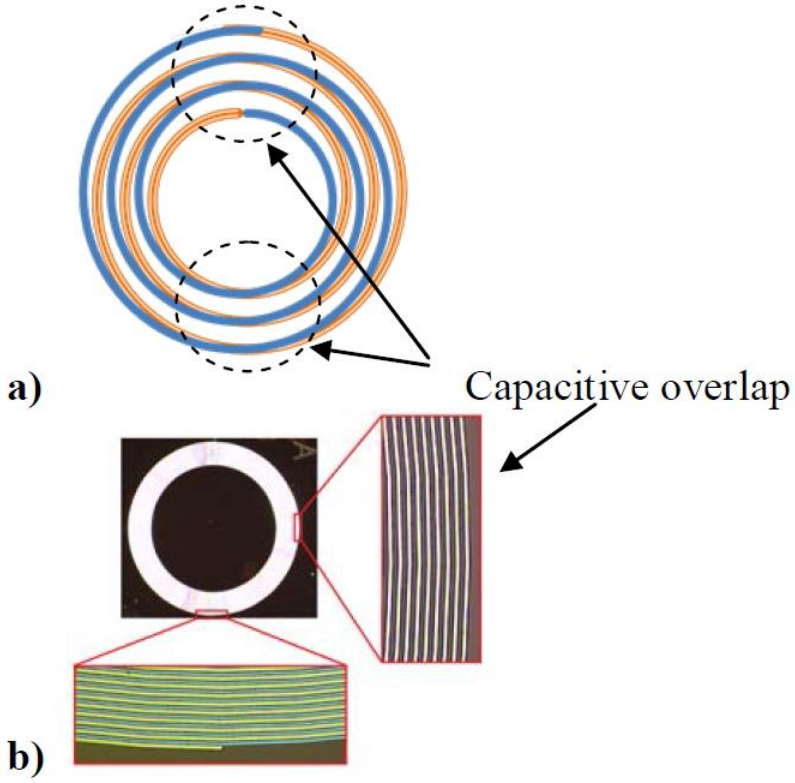


Рис. 3.12. (а) Эскиз двух-спирального резонатора. (б) Фотография двух спирального резонатора, использованная в нашем эксперименте. Двух-спиральная структура выполнена фотолитографией как трехслойная интегральная схема. На правой врезке витки двух спиралей совпадают (перекрываются), образуя емкостные элементы, а на нижней врезке не перекрываются.

Для измерения резонансных частот двух-спирального резонатора была использована измерительная установка, показанная на рисунке 3.6. Измеренный коэффициент передачи через измерительную установку показан

на рисунке 3.13. Многократные острые резонансные пики хорошо видны на измеренных данных. То что спирали закручены во встречных направлениях допускает связь резонатора с магнитной компонентой ЭМ поля, перпендикулярной плоскости резонатора. На измеренной зависимости коэффициента передачи S21 от частоты наблюдается сильная связь нечетных мод (f_1 = 6.9 МГц, f_3 = 51 МГц и f_5 = 120 МГц) с увеличением коэффициента связи на 20-30 дБ. Четные моды (f_2 = 26 МГц, f_4 = 82 МГц), на которых СВЧ-поле ограничено в основном плоскостью резонатора, слабее связаны с измерительными петлями.

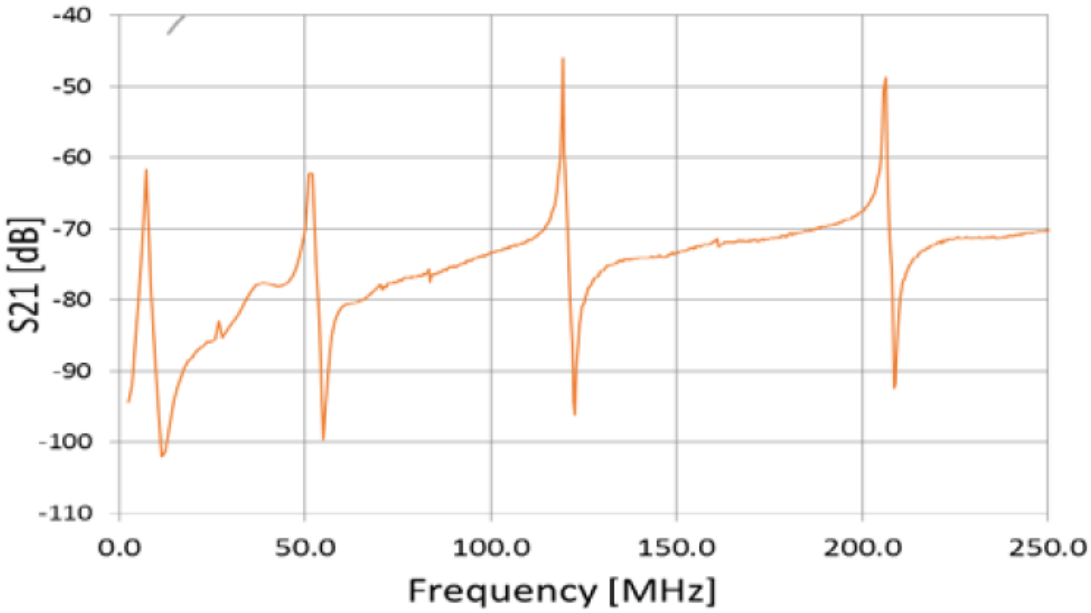


Рис. 3.13. Измеренный коэффициент передачи |S21| двух-спирального резонатора при T = 4.5 K в конфигурации тестовой установки, показанной на рисунке 2.11. Первая резонансная частота двух спирального резонатора (f1 = 7 МГц).

Резонансные частоты резонатора на двойной спирали (SR5), измеренные экспериментально и рассчитанные в HFSS методом DrivenModal представлены в таблице 8.

В таблице 8 рассчитанные резонансные частоты отличаются от экспериментальных в 1.16-2 раза. Разработанный глубоко суб-волновый резонатор может использоваться как мета-атом в экспериментах с СВЧ метаматериалами. Интересно отметить, что на первой моде диаметр резонатора составляет всего λ/14400, что приводит к тому, что компактность мета-атомов сравнима компактностью реальных атомов. Для сравнения можно взять Боровский радиус атома водорода (0.051 нм) и первую линию в Бальмеровских спектрах (653.3 нм), для которых λ/D около 6100.

Таблица 8. Резонансные частоты резонатора на двойной спирали (SR5), измеренные экспериментально и рассчитанные в HFSS методом DrivenModal.

Номер резонанса	Резонансные частоты, измеренные экспериментально [МГц]	Резонансные частоты, рассчитанные в HFSS [МГц]	Отношение экспериментального значения к расчетному f_{exp}/f_{HFSS}
1	6.9	3.40	2.03
2	26	15.00	1.73
3	50.9	32.80	1.55
4	82.5	58.70	1.41
5	117.5	90.50	1.30
6	160	130.00	1.23
7	205	176.00	1.16

3.4. Заключение

Предложен и исследован сверхпроводящий резонатор на двойной спирали. Численно рассчитаны резонансные частоты и распределения токов на них. В эксперименте на лазерном сканирующем микроскопе (ЛСМ) измерены резонансные частоты сверхпроводящего Nb резонатора и структура его внутренних мод. Результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них хорошо совпали с экспериментом. У двух спирального резонатора с диаметром D=6 мм фундаментальная резонансная частота уменьшилась в 4.2 раза (18 МГц) по сравнению с одиночным спиральным резонатором с диаметром D=6 мм, изученным ранее (76 МГц) [10].

Исследован ультра-компактный спиральный резонатор на двойной спирали в интегральном исполнении. Выполнен численный расчет резонансных частот спирального резонатора на двойной спирали в программе в HFSS. Рассчитана зависимость резонансной частоты первой моды от расстояния между спиралями для резонатора на двойной спирали. Рассчитанные резонансные частоты хорошо совпали с экспериментом. Противоположная намотка спиралей позволяет двух-спиральному резонатору взаимодействовать с магнитной компонентой ЭМ поля, перпендикулярной плоскости резонатора. Малый размер и простота изготовления делают двойной спиральный резонатор привлекательным решением для сверхпроводящих фильтров, схем связи.Достигнутый диаметр ультра-компактного резонатора относительно длинны волны $D=\lambda/14400$.

Глава 4

Разработка держателя образцов для проведения широкополосных СВЧ измерений при криогенных температурах

4.1. Введение.

В данном разделе представлен практический дизайн и описано применение широкополосного держателя образцов сверхпроводящих микросхем, предназначенного для СВЧ экспериментов при сверхнизких температурах, до нескольких мили-Кельвинов. Предложенная конструкция может быть легко интегрирована в стандартные криостаты, имеет рабочий диапазон частот от 0 до 32 ГГц, и позволяет проводить СВЧ измерение образцов с размером подложки до 4×4 мм^2. Проанализированы и предотвращены паразитные резонансы в держателе. Разработанная установка может быть использована для измерения сверхпроводящих параметрических усилителей, болометров и кубитов. Мы использовали разработанный держатель образца при измерении характеристик сверхпроводящего потокового кубита при температуре 20 мК.

Существенную проблему представляет измерение частотно-зависимых СВЧ параметров активных сверхпроводящих устройств, например джозефсоновских кубитов, из-за паразитных резонансов и проблем с калибровкой в цепях, соединяющих измеряемое устройство, расположенное при милликельвиновых температурах, со стандартным СВЧ измерительным оборудованием. Было разработано большое количество криогенных измерительных установок и зондовых станций для измерения СВЧ параметров в температурном диапазоне 4-100 К для частот до 200 ГГц [47, 48]. СВЧ измерения в температурном диапазоне единиц мили-Кельвин представляют дополнительную трудность из-за особой сложности криостата и его ограничений по мощности охлаждения. Кроме того, при измерении характеристик сверхпроводящей СВЧ электроники, содержащей

джозефсоновские переходы, приходится подавлять внешние магнитные поля, что, в свою очередь, требует наличия магнитных экранов, ограничивающих доступ к электронным компонентам вблизи исследуемого образца.

Недавно в ряде работ были представлены новые установки для СВЧ испытаний сверхпроводящих электронных микросхем при температурах около мили-Кельвина [49, 50]. Держатель микросхемы без паразитных резонансов для полосы частот от 0 до 8 ГГц был разработан Hornibrook и др. [3], а другой - Chow и др. [4] - для полосы частот от 0 до 15 ГГц. Обычно криогенный держатель образцов служит для установления высокочастотного соединения сверхпроводящего устройства с коаксиальным кабелем (или волноводом) через стандартные СВЧ разъемы. Для выполнения СВЧ рефлектометрии образца с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ) желательно соединение с низким уровнем потерь, что упрощает калибровку.

В общем случае, эксперимент по рефлектометрии предполагает тестирование устройства, включенного в схему с одномодовыми линиями передачи, поскольку концепция коэффициентов отражения и передачи имеет смысл только в случае одномодового распространения сигналов. Кроме того, если волна на моде более высокого порядка может распространяться внутри держателя образца или в одном из его участков, в цепи могут возникать неожиданные паразитные резонансы в областях, где сосредоточена энергия более высокой моды. Если условия для распространения более высокой моды удовлетворяются, то возбуждение высшей моды может происходить на случайных, нерегулярных малых неровностях или асимметриях в волноводах, возникших в результате ошибок изготовления. Это приводит к трудностям анализа данных и калибровки тестовой схемы. Также, сходная сложность возникает, когда зондирующий сигнал обходит устройство через паразитный канал, возникший на моде более высокого порядка. Например,

такой параллельный канал может вызвать неожиданные потери и уменьшать добротность резонаторов на копланарных линиях (КЛ) передачи [49].

Сверхпроводящий копланарная линия передачи является предпочтительным для проектирования множества типов сверхпроводящих интегральных схем, таких как параметрические усилители Джозефсона [51-55], болометры [56-58] и микроволновые схемы со сверхпроводящими кубитами [59-63]. Сверхпроводящие КЛ часто изготавливаются с использованием Nb, NbN или Al, нанесенных на подложку из кремния или сапфира. Схемы, основанные на КЛ, в целом свободны от возбуждения высших мод и от связанных с этим проблем. Первая высшая мода может распространяться в КЛ, когда фазовая длина периметра поперечного сечения центральной линии близка к половине длины волны в свободном пространстве. Поскольку ширина центральной линии сверхпроводящего КЛ может составлять всего несколько микрометров, частотный предел одномодового режима КЛ может быть далеко в терагерцовом диапазоне, значительно выше по частоте, чем диапазон рабочих частот устройства. Тем не менее, КЛ не является полностью беспроблемным. Поскольку излучение в КЛ не полностью изолировано от окружающего пространства, оно может связываться с волноводными модами внутри корпуса образца, например, в пространстве над каналами КЛ. Даже слабая связь с более высокой модой может привести к нежелательным потерям или к изменению спектрального отклика схемы. Для разработки широкополосных схем на основе КЛ важно избегать любых возбуждений волноводных мод в пространстве над исследуемой схемой.

В этой работе мы описываем практическую конструкцию держателя образца для измерения СВЧ характеристик сверхпроводящих микросхем при температурах около милликельвина и в диапазоне частот от 0 до 32 ГГц. Сначала мы описываем детали конструкции держателя образца и обсуждаем пути предотвращения возбуждения высших мод и помех, связанных с

высшими модами. Затем мы проверяем пределы рабочей полосы частот установки путем численного моделирования и представляем результаты экспериментальной проверки, в том числе измеренные характеристики образца потокового кубита на контакте Джозефсона при температуре 20 мК.

4.2. Устройство держателя сверхпроводящих микросхем.

Мы разработали криогенный держатель образцов микросхем для СВЧ измерений при сверхнизких температурах, около единиц мили-Кельвина. Держатель состоит из медной базовой пластины с тестовой платой, четырёх СВЧ разъемов на плате (рис. 4.1а), и крышки держателя (рис. 4.1б). Крышка держателя обычно остаётся прикреплённой к криостату. Базовая пластина удерживает исследуемый образец и может быть легко демонтирована, а затем снова подсоединена, когда это необходимо. Использование монтируемых на плате стандартных разъемов SMP значительно упрощает подключение держателя к установке криогенного тестирования, просто защёлкивая разъёмы. Разъем SMP представляет собой защёлкиваемый высокочастотный разъем с рабочим диапазоном частот от 0 до 40 ГГц. Эта особенность особенно полезна для быстрой замены образцов в криостате с использованием набора сменных идентичных базовых пластин. Компактная компоновка испытательной платы с разъемами, ограниченная диаметром 40 мм, облегчает встраивание держателя в цилиндрический магнитный крио-пермалоевый экран или во внешний соленоид. Линии передачи на печатной плате, соединяющие тестируемый образец с СВЧ разъемами, изготавливаются в соответствии с положением контактных площадок на сверхпроводящей микросхеме. Широкий паз для намотки сверхпроводящей магнитной катушки расположен на внешней боковой поверхности верхней части держателя (рис.1б). Намотанный на корпус держателя электромагнит часто используется, например, в экспериментах со сверхпроводящими кубитами. На печатной плате испытательной схемы КЛ имеет

характеристический импеданс 50 Ом. Материал платы - диэлектрик AD1000 толщиной 0.5 мм с диэлектрической постоянной ε_r = 10.6. Поперечные отверстия, расположенные на расстоянии 1 мм, помещаются с обеих сторон от КЛ, чтобы предотвратить возбуждение нежелательных мод в подложке печатной платы.

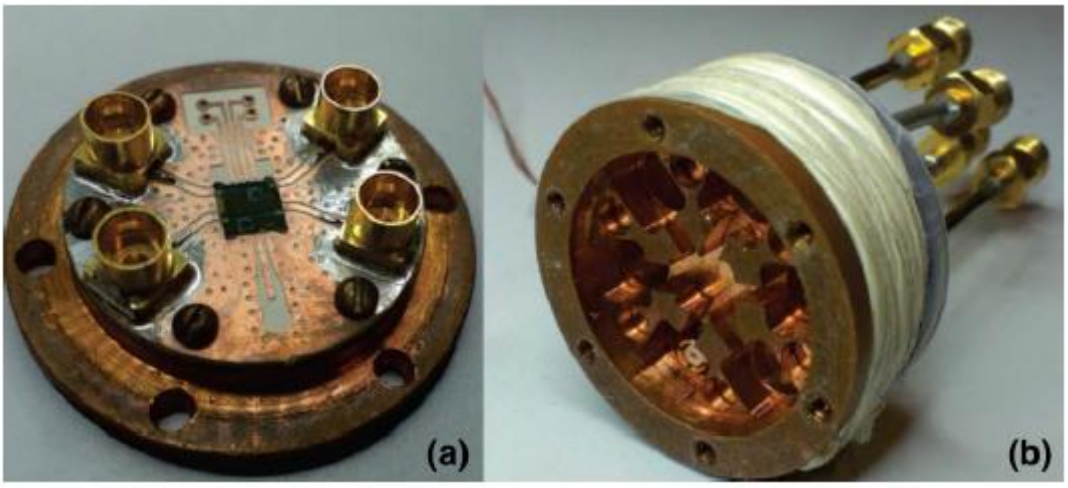


Рис. 4.1. Нижняя (а) и верхняя (б) части разработанного держателя образцов. Верхняя часть крепится к криостату. К нижней части держателя присоединена печатная плата с отверстием в центре, в которое установлен образец. На плате имеются четыре 50-омные копланарные линии (КЛ) передачи, которые соединяют порты образцов и поверхностные SMP-разъемы. Обратите внимание на сквозные отверстия с металлизацией, предотвращающей утечку сигнала и паразитные связи внутри держателя. Узкие каналы в верхней части (б) держателя образца уменьшают пространство над КЛ, тем самым предотвращая возбуждение и распространение волноводных мод над печатной платой, а также паразитные резонансы.

Уменьшение внутреннего объема держателя образцов помогает поднять частоты высших мод выше рабочей полосы частот. Предел уменьшения размеров держателя задается размером подложки испытуемой сверхпроводящей микросхемы и размерами СВЧ разъемов. В наших экспериментах с кубитом типичный размер подложки составляет 4×4 мм^2.

Для размещения образца полость с площадью основания 5×6.5 мм^2 была сделана над подложкой образца в середине верхней части держателя. На плате образец соединен с СВЧ разъемами КЛ, проходящими в узких каналах (рис. 4.1 и 4.2). Ширина и высота канала выбраны достаточно малыми, чтобы предотвратить распространение волноводных мод в интересующей нас полосе частот. Площадь поперечного сечения области возможного распространения волноводной моды ограничена стенками канала, сквозными отверстиями на печатной плате и нижней металлизацией печатной платы (рис. 4.2).

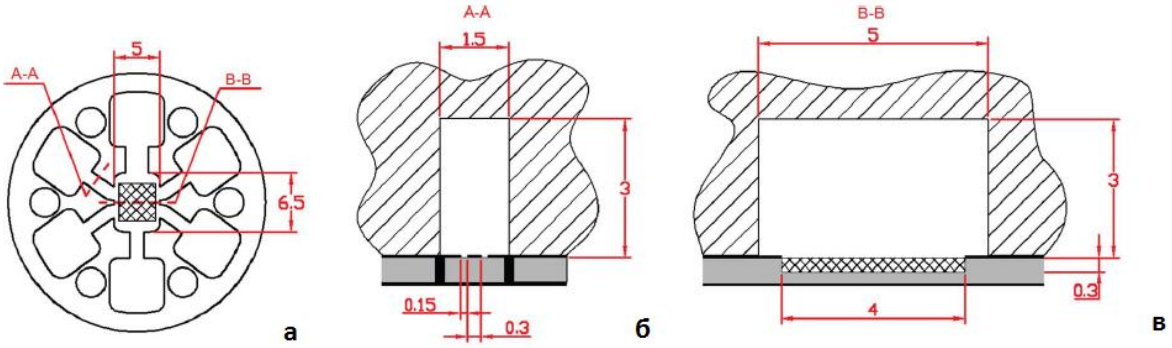


Рис. 4.2. Конструкция держателя образца. Все размеры указаны в миллиметрах. (а) Вид снизу на верхнюю часть держателя образца (показан на рисунке 4.1б). Местоположение чипа 4x4 мм^2 отмечено заштрихованной областью. (б) Вертикальное поперечное сечение канала шириной 1.5 мм вдоль линии A-A. Печатная плата показана серым цветом, а металлизация КЛ и сквозных отверстий черным цветом. (в) Вертикальное поперечное сечение центральной камеры с печатной платой (серый) и подложкой со сверхпроводящей схемой (поперечная штриховка).

Узкий канал над печатной платой (рис. 4.2б) можно рассматривать как прямоугольный волновод. Частота среза f_{Cwg} для первой моды прямоугольного волновода равна определяется формулой:

$$f_{Cwg} = \frac{c}{2a\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad (4.1)$$

где a - ширина волновода, c - скорость света в свободном пространстве, ε_{eff} - эффективная диэлектрическая проницаемость в волноводе. На первой волноводной моде, когда тонкий диэлектрический слой платы КЛ расположен вдоль узкой стенки прямоугольной полости, эффективная диэлектрическая проницаемость близка к единице [64].

Выбор размера канала равного 1.5×3 мм^2 позволяет избежать распространения волноводных мод в канале вплоть до 50 ГГц. Высота канала достаточна для обеспечения малости паразитной емкости между элементами КЛ и стенками канала.

В качестве приближения первого порядка, полость над микросхемой может рассматриваться как объемный резонатор. Наименьшая резонансная частота волноводной моды этого резонатора определяется формулой:

$$f_{Cav} = \frac{c\sqrt{d^2 + l^2}}{2dl}, \qquad (4.2)$$

где c - скорость света в свободном пространстве, d и l - ширина и длина полости. Для резонатора размером d = 6.5 мм на l = 5 мм, частота f_{Cav} = 37.9 ГГц, что значительно превышает целевой диапазон до 30 ГГц. Эффективный объем резонатора увеличивается за счет отверстий канала на краях камеры (рис. 4.2), и поэтому реальная резонансная частота оказывается несколько ниже, чем даёт оценка по упрощенному подходу, принятому в уравнении (4.2). Ниже представлен более точный численный анализ паразитного резонанса волноводной моды.

Таблица 9. Рассчитанные резонансные частоты волноводной моды в зависимости от размера резонансной полости над образцом.

Размер резонансной полости ($мм^2$)	Резонансная частота (ГГц)
5x5.0	35.05
5x6.5	32.30
5x8.0	30.21

С помощью программного пакета ANSYS HFSS была подготовлена численная электродинамическая модель структуры держателя. В расчетах мы использовали подробный трехмерную модель держателя с печатной платой и разъемами, как показано на рисунке 4.2. Канал, идущий вверх от центральной камеры на рис. 4.2, имеет ширину 2.5 мм; он используется для 4 линий смещения постоянного тока. Все остальные каналы, используемые для КЛ, имеют ширину 1.5 мм. Длина камеры составляет 5 мм, а ее ширина варьируется при моделировании. Согласно модели HFSS, схема работает до 32 ГГц без паразитных резонансов, как это и должно быть в одномодовом КЛ (рис. 4.3). Первая резонансная особенность в частотной зависимости коэффициента пропускания | S21 (f) | появляется на частоте выше 32 ГГц и зависит от размеров центральной камеры. Так как в зависимости от размера исследуемых сверхпроводящих микросхем, размер полости над микросхемой может варьироваться, в таблице 9 мы даем рассчитанные паразитные резонансные частоты для размеров полости 5×5 $мм^2$, 5×6.5 $мм^2$ и 5×8 $мм^2$. В нашем эксперименте размер камеры выбран 5×6.5 $мм^2$.

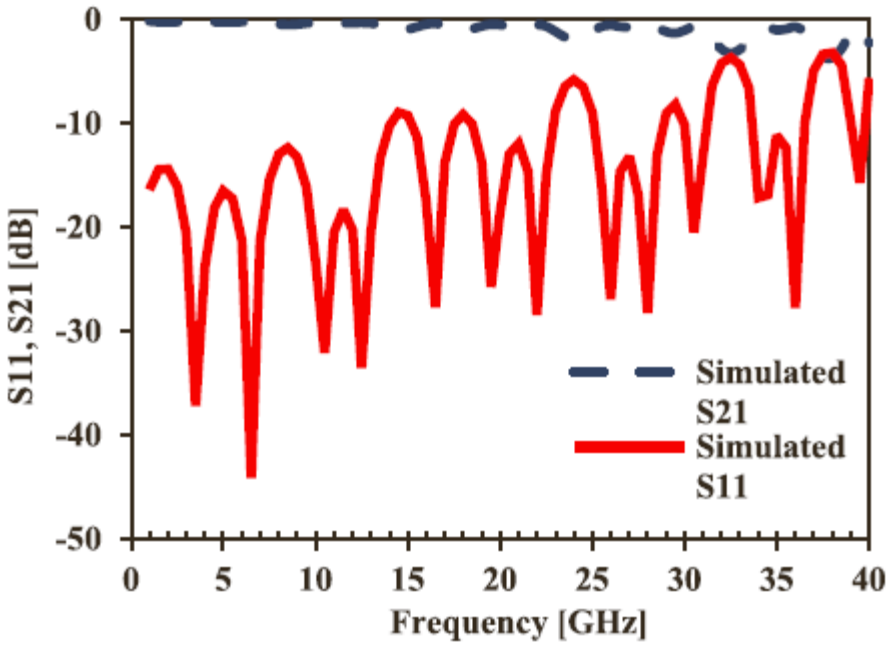


Рис. 4.3. Рассчитанные коэффициент передачи S21 от частоты (пунктирная линия) и коэффициент отражения S11 от частоты (сплошная линия) в держателе образца с секцией 50-омной КЛ. Держатель образца хорошо согласован с коаксиальными линиями вплоть до 32 ГГц. Подробности резонанса представлены на рисунке 4.4.

Разработанный держатель образца (с размером полости 5×6.5 мм^2) работает в одномодовом режиме до 32 ГГц (рис. 4.3 и 4.4). Результат моделирования в HFSS электрического поля в пространстве над образцом на первой резонансной частоте f_1=32.3 ГГц представлен на рисунке 4.4а. Как можно видеть, на частоте резонанса пучность СВЧ электрического поля расположена в центральной полости над подложкой с тестируемой микросхемой. Этот эффект может оставаться незамеченным, если тестируемое устройство имеет низкие потери при передаче на резонансной частоте f_1. Паразитный резонанс становится более заметен в случае низкого коэффициента передачи через исследуемое устройство. Например, при разрыве центральной линии в середине образца, резонанс на f_1 сильно влияет на коэффициент передачи через держатель с образцом (рис. 4.4б). На рис.4.4б

коэффициенты передачи S21 (f) и отражения S11 (f) рассчитываются для случая, когда в центральном проводнике КЛ присутствует разрыв, действующий как небольшой конденсатор. Взаимодействие между КЛ и объемным резонатором, сформированным между основанием и крышкой держателя, достаточно сильное, чтобы создать значительную паразитную связь на резонансной частоте. Заметим, что на частоте 32.3 ГГц волноводная мода ограничивается пространством над образцом и не распространяется по узким каналам через внутреннее пространство держателя.

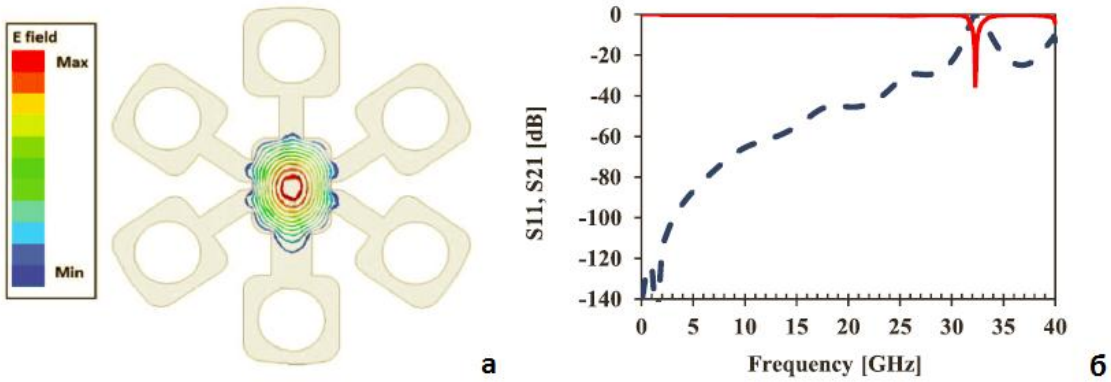


Рис. 4.4. Разработанный держатель образца не имеет паразитных резонансов в диапазоне частот от 0 до 32 ГГц. Первый паразитный резонанс происходит на частоте 32.3 ГГц. (а) Распределение амплитуды электрического поля на частоте 32.3 ГГц в пространстве над печатной платой. На частоте 32.3 ГГц энергия ограничена пространством над образцом. (б) Прохождение сигнала через держатель с емкостным разрывом в КЛ в середине платы. Здесь коэффициент передачи S21 показан пунктирной линией, а коэффициент отражения S11 жирной линией.

4.3. Экспериментальное исследование СВЧ характеристик держателя образцов.

В эксперименте мы сначала проверили держатель образца на наличие паразитных резонансов в простейшей конфигурации - с участком 50-омной копланарной линии вместо образца. Устанавливая участок 50-омной копланарной линии вместо образца, мы измерили передачу без крышки, а затем с прикрепленной крышкой. Поскольку волноводные моды возбуждаются в пространстве под крышкой, разница указывает на наличие (или отсутствие) связанных паразитных резонансов. Измеренная передача через держатель не изменяется, когда крышка находится на месте, и нет видимых следов паразитных резонансов в |S21 (f)| в диапазоне 0.01-27 ГГц (рис. 4.5), что подтверждает предсказания нашего численного моделирования. Измеренные потери в основном связаны с подводящими кабелями и разъемами, используемыми в эксперименте. Потери растут от 0 дБ на низких частотах, до 5 дБ на частоте 25 ГГц. Этот уровень потерь приемлем для криогенной установки, где аттенюаторы 10-30 дБ обычно используются для подавления тепловых шумов комнатной температуры, проходящих через соединительные кабели. Для измерений коэффициента передачи использовался ВАЦ Agilent PNA-X 0.01-26.5 ГГц.

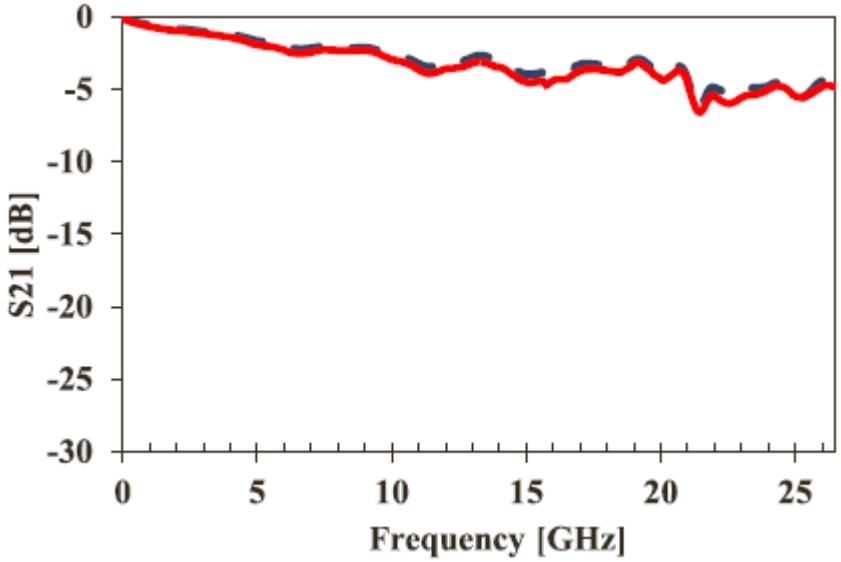


Рис. 4.5. Измерение держателя образца при комнатной температуре. Измеренный коэффициент передачи S21 через держатель, где вместо образца вставлен отрезок 50-омной КЛ обозначен сплошной линией для данных без крышки и пунктирной линией – с установленной крышкой. Поскольку волноводные моды возбуждаются в пространстве под крышкой, разница будет указывать на наличие паразитных резонансов. Эти два измерения дали почти одинаковые результаты, подтверждающие, что держатель образца свободен от паразитных резонансов в диапазоне частот 0-27 ГГц. Потери 5 дБ в разъемах и кабелях на частоте 25 ГГц приемлемы для нашего применения.

Мы проверили разработанный держатель образца, использовав его для измерения СВЧ характеристик джозефсоновского потокового кубита. В тестируемой сверхпроводящей микросхеме кубит встроен в копланарный резонатор, который, в свою очередь, слабо связан ёмкостным образом с управляющей копланарной линией на микросхеме [65]. Откликом цепи является узкий резонансный пик поглощения видимый в S21(f) около 12 ГГц (рис. 4.6). Измерения проводились при температуре 20 мК в криостате растворения. В этих измерениях полоса рабочих частот малошумящего

криогенного усилителя ограничивает зону наблюдений до диапазона 3-20 ГГц. Обратите внимание на равномерную передачу в рабочей полосе 3-20 ГГц и отсутствие паразитных резонансов в измеренных данных.

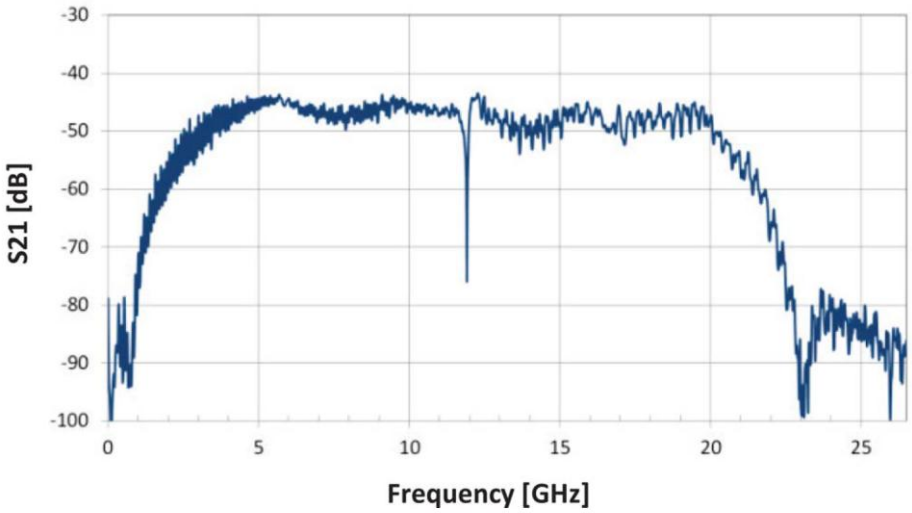


Рис. 4.6. Пример использования разработанного держателя образцов СВЧ микросхем. Измеренная передача представляет собой СВЧ отклик схемы считывания джозефсоновского потокового кубита. Потоковый кубит слабо связан с копланарным резонатором с резонансной частотой около 12 ГГц. Измерение проводится при температуре 20 мК. Ширина полосы измерения ограничена диапазоном 3-20 ГГц полосой криогенного малошумящего усилителя. Отметим равномерную передачу и отсутствие паразитных резонансов в интересующем частотном диапазоне.

Наконец, мы использовали разработанный держатель микросхем для проведения спектроскопии сверхпроводящего потокового кубита (рис. 4.7). В микросхеме кубита считываемый микроволновый сигнал подаётся через копланарную линию, соединенную с семью четвертьволновыми резонаторами с различными резонансными частотами. Потоковый кубит состоит из сверхпроводящего кольца с тремя джозефсоновскими переходами и индуктивно связан с соответствующим резонатором [65, 66]. В дополнение

к сигналу считывания на частоте изменяемой в широком диапазоне, применялся еще один микроволновый тон для спектроскопии. Дисперсионный сдвиг резонатора происходил, когда кубит возбуждался между его основным и возбужденным состояниями и регистрировался с помощью векторного анализатора цепей, измеряющего амплитуду и фазу сигнала СВЧ считывания, проходящего через образец, в зависимости от мощности и частоты зондирующего сигнала. Сигнал считывания, проходящий через образец, усиливался криогенным HEMT усилителем мощности, установленном при 4 К, а затем цепочкой усилителей, установленных при комнатной температуре. Мы установили аттенюаторы на СВЧ входе и вентили на СВЧ выходе из держателя образцов, чтобы изолировать кубит от источников теплового шума и отражений сигнала. Энергетический спектр кубита контролировался внешним магнитным полем, создаваемым сверхпроводящей катушкой.

Измеренный спектр потокового кубита (рис. 4.7) не содержит паразитных резонансов и дает типичную гиперболическую зависимость частоты кубита от магнитного потока (пропорциональную току, подаваемому на катушку смещения). Зависимость резонансной частоты кубита от Δ и отстройки частоты потоком ε определяется уравнением $\omega_q = \sqrt{\Delta^2 + \varepsilon^2}$ и позволяет определить расщепление нижнего уровня для точки симметрии кубита около $\Delta \approx 1.8$ ГГц.

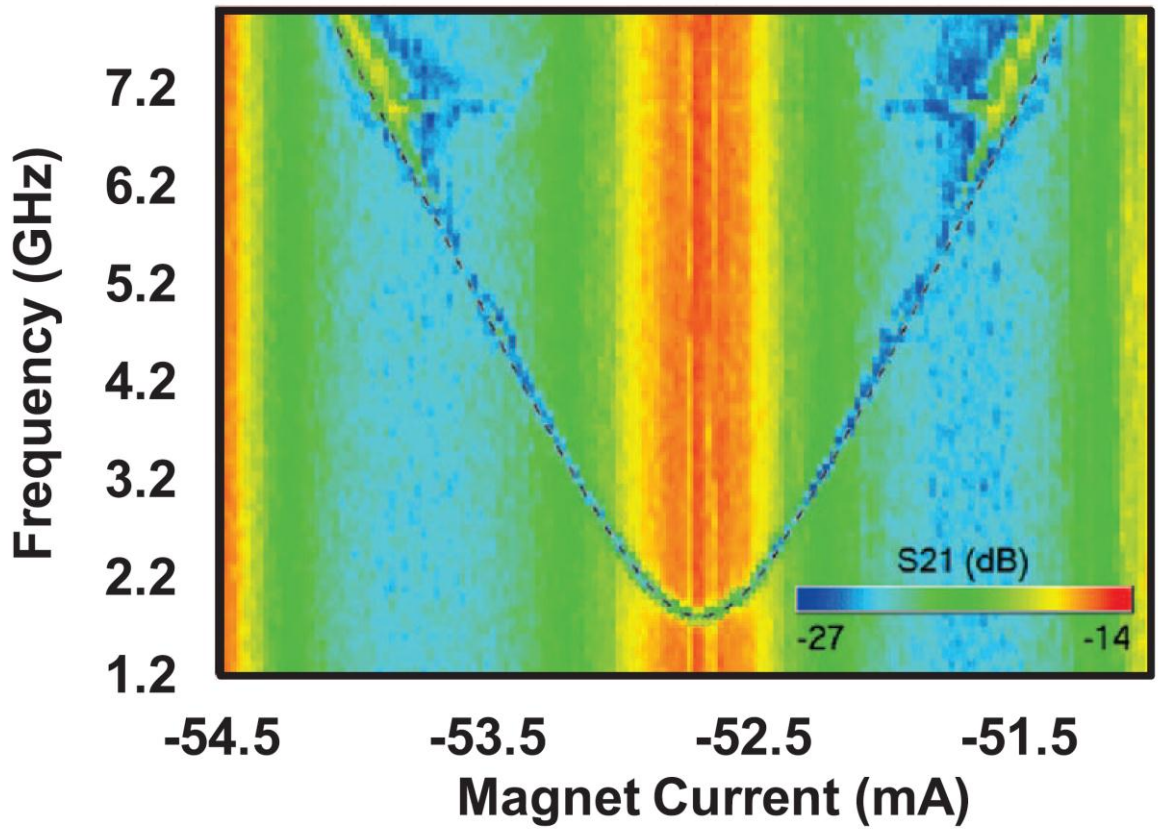


Рис. 4.7. Пример измеренного энергетического спектра (переход |0_-|1_) потокового кубита в зависимости от магнитного поля (т. е. от постоянного тока, приложенного к катушке задания магнитного поля). Сверхпроводящее кольцо кубита слабо связано с четвертьволновым считывающим резонатором на образце. Из этих данных получается расщепление первого уровня ($\Delta \approx 1{,}8$ ГГц) и положение точки вырождения кубита.

4.4. Заключение.

Разработан широкополосный криогенный держатель образца для СВЧ измерений сверхпроводящих схем при милликельвиновых температурах. В держатель можно установить образец с размерами 4×4 мм^2 и подать на образец СВЧ сигналы, используя 4 копланарные передающие линии. Численное электродинамическое моделирование выполнено для предотвращения появления волноводных мод и паразитных резонансов. В

разработанном держателе образцов отсутствуют паразитные резонансы в диапазоне частот от 0 до 32 ГГц. Держатель использовался для измерения дисперсионного сдвига и измерения спектра джозефсоновского потокового кубита при температуре 20 мК. Разработанная конструкция держателя может быть применена для СВЧ измерений сверхпроводящих параметрических усилителей, болометров и кубитов.

Глава 5

Двумерный сверхпроводящий метаматериал на основе высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов)

5.1. Введение.

В настоящее время большое внимание направлено на исследования СВЧ сверхпроводящих метаматериалов, в частности сверхпроводящих мета-поверхностей [21, 29]. Двумерный массив высокочастотных сверхпроводящих квантовых интерферометров (ВЧ-СКВИДов) имеет ряд полезных применений. Поскольку СКВИД может быть использован в качестве магнитосвязанного ВЧ микро-резонатора, то это хороший кандидат на роль магнитного мета-атома, резонансная частота которого может быть перестроена внешним магнитным полем. Отклик массива ВЧ СКВИДов был изучен теоретически [29-31] и, в некоторой степени, экспериментально [32]. В работе [32] была продемонстрирована возможность перестройки резонансной частоты массива ВЧ СКВИДов постоянным магнитным полем, температурой и мощностью СВЧ сигнала. В таком эксперименте, основанном на измерении коэффициента передачи S21 радиочастотного сигнала через образец массива СКВИДов, трудно оценить фактическое число СКВИДов, участвующих в синхронизированном ВЧ отклике. Степень равенства амплитуды отклика и динамика большого массива СКВИДов также остались неясной.

Криогенный лазерный сканирующий микроскоп (ЛСМ) [33] дает прекрасную возможность для прямого наблюдения токов в плоском сверхпроводящем массиве СКВИДов. В экспериментах с ЛСМ мы получаем распределение ВЧ-резонансных токов в планарном сверхпроводящем массиве и можем видеть отклик отдельных СКВИДов в массиве на лазерный луч и можем оценить однородность ВЧ-отклика.

В этой главе описано экспериментальное исследование микроволнового отклика отдельных мета-атомов сверхпроводящей мета-поверхности, образованной двумерным массивом сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов). В эксперименте высокочастотные токи мета-поверхности непосредственно измерены с использованием метода криогенной лазерной сканирующей микроскопии (ЛСМ). Протестирован образец массива 21x21 СКВИДов в камере прямоугольного волновода, предназначенной для достижения равномерного распределения микроволн по всему массиву.

5.2. Разработка образцов двумерного метаматериала на основе ВЧ-СКВИДов.

Базовый элемент метаматериала, использованный в данной работе – это одно контактный ВЧ-СКВИД. Такой ВЧ-СКВИД состоит из контакта джозефсона, вставленного в разрыв сверхпроводящего кольца, как показано на Рис. 5.1а. Контакт обозначен красным крестом. В приближении малого сигнала джозефсоновский контакт может быть представлен как нелинейная индуктивность [38, 44]. Если джозефсоновская индуктивность Lj размещена внутри сверхпроводящего кольца, то она может быть перестроена внешним магнитным полем. Общая индуктивность ВЧ-СКВИДа Ltot состоит из геометрической индуктивности Lgeo сверхпроводящего кольца и из джозефсоновской индуктивности Lj. Эквивалентная электрическая схема представлена на Рис. 5.1б. Красным кругом обозначена эквивалентная электрическая схема джозефсоновского контакта, для которого использована модель контакта, шунтированная резистором и емкостью [44]. Также как разрезной кольцевой резонатор (РКР) ВЧ-СКВИД может быть представлен как LC резонатор. Однако, в отличие от РКР общая индуктивность и, следовательно, резонансная частота ВЧ-СКВИДа может быть перестроена, в том случае если переменная компонента магнитного поля мала.

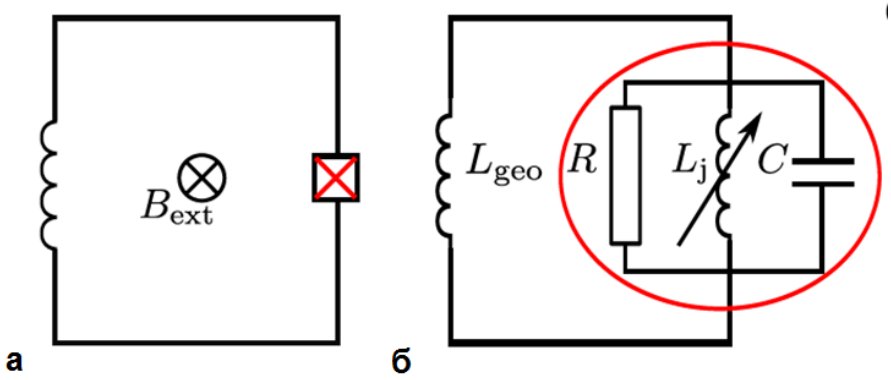


Рис. 5.1. (а) Схематическое изображение ВЧ-СКВИДа. Контакт Джозефсона обозначен красным крестом. (б) Эквивалентная электрическая схема ВЧ-СКВИДа в приближении малого сигнала. Lgeo – геометрическая индуктивность кольца ВЧ-СКВИДа. Часть эквивалентной электрической схемы, соответствующая джозефсоновскому контакту, выделена красным овалом: R – сопротивление, обусловленное током квазичастиц; Lj – джозефсоновская индуктивность; C – шунтирующая емкость перекрытия сверхпроводящих электродов.

СКВИД изготовлен, используя трехслойный технологический процесс Nb/AlOx/Nb. джозефсоновский контакт – это круг диаметром 1.6 мкм, его критический ток Ic = 1.86 пГн. Их этого значения была рассчитана джозефсоновская индуктивность (индуктивность джозефсоновского тока) при нулевом поле Lj = 183 пГн. Контакт шунтирован дополнительным плоским конденсатором с емкостью Cshunt = 2.0 пФ, которая на два порядка больше, чем собственная емкость джозефсоновского контакта. Из-за наличия шунтирующего конденсатора, резонансная частота ВЧ-сквида уменьшена и может быть перестроена в диапазоне от 9 ГГц до 15 ГГц.

Были изготовлены образцы массива 21x21 ВЧ-СКВИДов (рис.5.2). Каждый ВЧ-СКВИД изготавливается как тонкопленочная прямоугольная петля из Nb с внешними размерами 70x50 мкм, перехваченная одним джозефсоновским контактом Nb/AlOx/Nb. Внутренняя площадь петли

составляет 2000 мкм^2, критический ток перехода составляет около Ic=1.86 мкА, а емкость, шунтирующая джозефсоновский контакт равна C=2 пФ. Расстояние между СКВИДами составляет 5-10 мкм, около 1/10 от их размера, поэтому связь между соседними СКВИДами довольно сильная.



Рис. 5.2. Оптическое изображение части массива 21x21 СКВИД с 9 СКВИДами.

5.3. Разработка камеры для оптических исследований двумерных сверхпроводящих метаматериалов.

Связь СКВИДов с ЭМ-волной наиболее эффектива, когда магнитная составляющая падающей волны перпендикулярна плоскости СКВИДов. Кроме того, естественным требованием для тестовой установки был бы равномерный уровень возбуждения ВЧ токов в СКВИДах по всему массиву. Эти два требования могут быть выполнены, когда матрица СКВИДов среднего размера (размер массива меньше длинны волны $d << \lambda$) помещается в вертикальную плоскость симметрии прямоугольного волновода, работающую в режиме волны TE10 (с низким уровнем стоячих волн). Как известно, в стандартном прямоугольном волноводе компонента магнитного поля основной моды TE10 всегда перпендикулярна вертикальной плоскости симметрии, т. е. плоскости симметрии, параллельной узкой стенке

волновода. Аналогичный тип волноводной тестовой полости был недавно использован для исследования коллективного ответа массива СКВИД в [32].

Разработка тестовой камеры для измерения массива СКВИДов состояла из нескольких этапов. Конструкция измерительной камеры была оптимизирована с помощью программного обеспечения ANSYS HFSS, чтобы обеспечить максимальный и независящий от частоты коэффициент передачи S21 через тестовую камеру. Сначала был выполнен расчет одного коаксиально волноводного перехода (КВП). Расчетная модель одного КВП показана на рисунке 5.3. На верхнюю стенку коаксиального кабеля присвоен возбуждающий порт, который является источником СВЧ сигнала. На правую стенке волновода присвоен возбуждающий порт с вектором E, параллельным узкой стенке волновода. На остальные стенки волновода присвоено граничное условие PerfectE (идеальная металлическая поверхность).

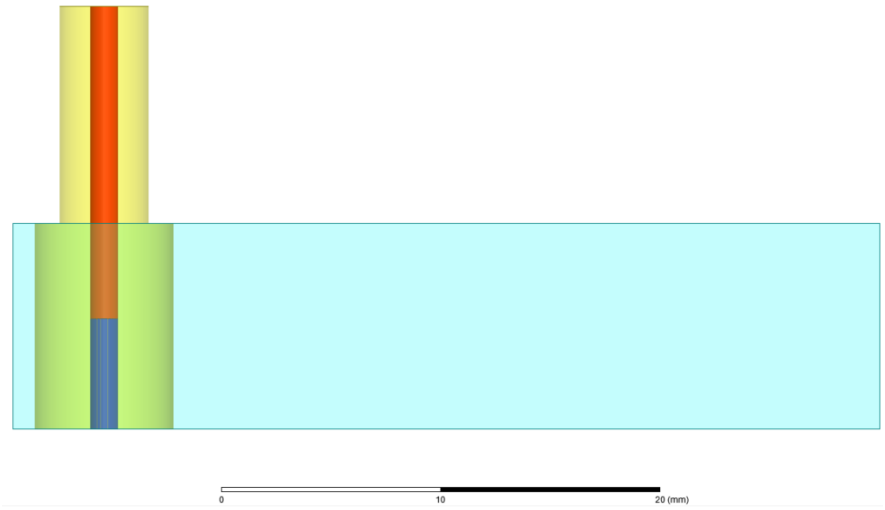


Рис 5.3. Трехмерная расчетная модель КВП, созданная в HFSS (боковое сечение). Модель КВП состоит из участка прямоугольного волновода сечением 19x9.5 мм и диэлектрической проницаемостью e_r=1 (голубым цветом); тефлоновой втулки в волноводе с продольным сквозным отверстием (желтым цветом) и коаксиального кабеля, подключенного сверху. Коаксиальный кабель состоит из центрального проводника (красным цветом)

и тефлонового диэлектрика с диэлектрической проницаемостью e_r=2.1 (желтым цветом).

В расчетной модели в качестве оптимизационных параметров варьировались: положение точки включения SMA разъема относительно задней стенки прямоугольного волновода (переменная l), длинна штыря SMA разъема внутри волновода (переменная h) и радиус фторопластовой втулки (переменная rt). В качестве критерия оптимизации выбран уровень S11<-10 дБ в частотном диапазоне от 9 до 15 ГГц.

S-параметры КВП, рассчитанные в HFSS для найденных оптимальных значений переменных: l=4.2 мм; h=4.4 мм; rt=3.2 мм показаны на рисунке 5.4.

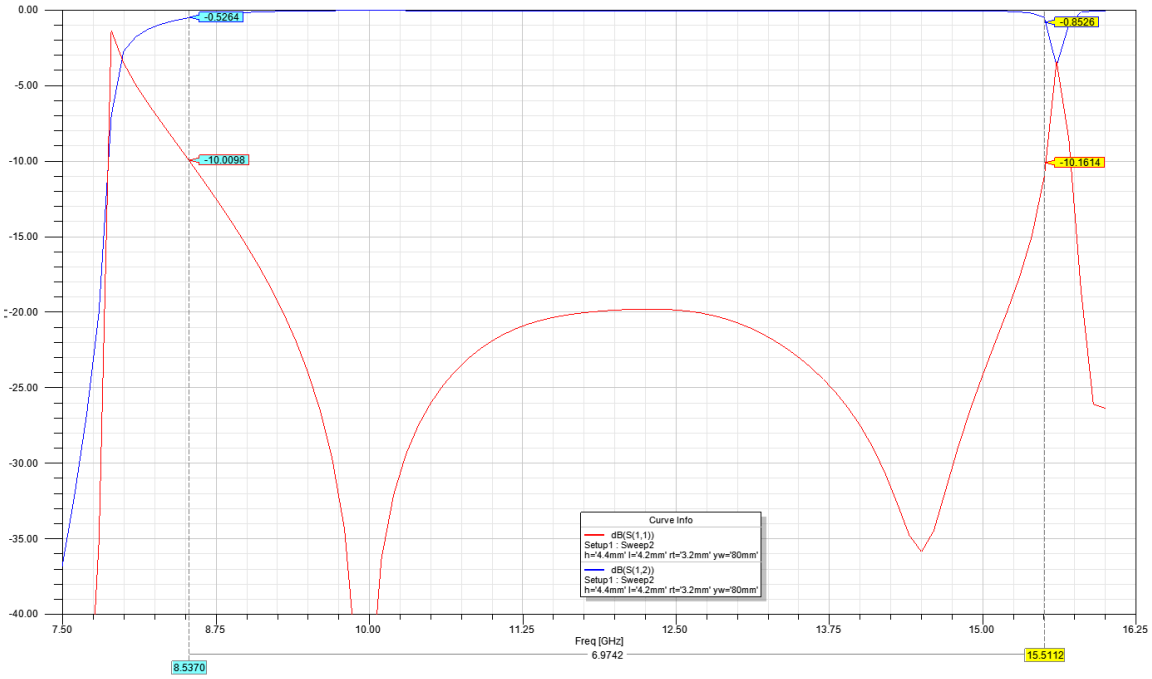
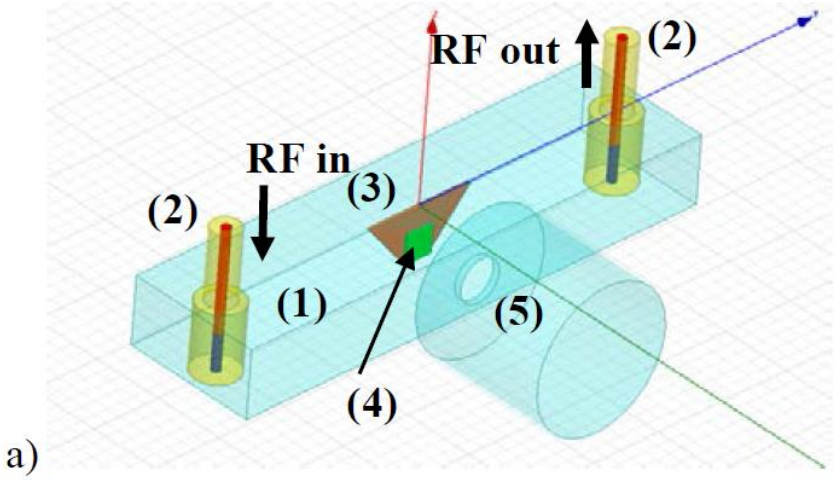


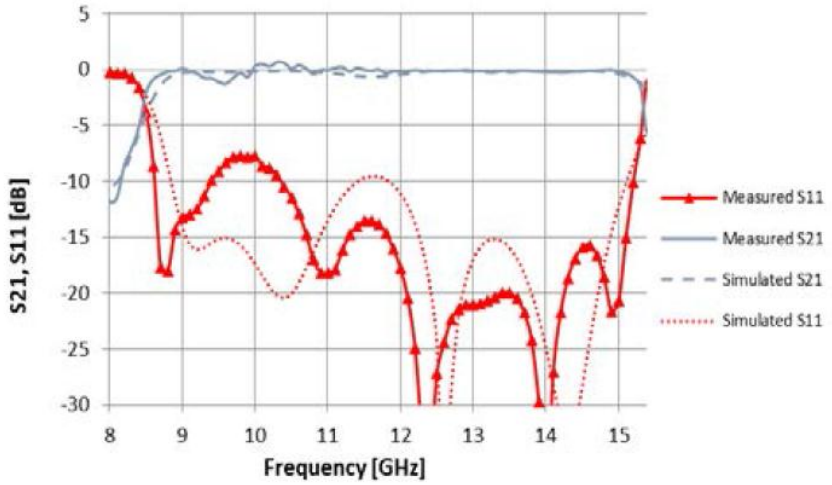
Рис 5.4. Зависимость S-параметров от частоты для КВП с найденными оптимальными параметрами l=4.2 мм ,h=4.4 мм, rt=3.2 мм, рассчитанная в HFSS. S11 показан красным цветом, S21 показан синим цветом.

После того как были найдены оптимальные параметры одиночного КВП, была построена полная расчетная модель тестовой камеры. Расчетная модель тестовой камеры, созданная в HFSS, показана на рисунке. 5.5а.

Расчетная модель состоит из двух КВП, соединенных отрезком прямоугольного волновода 19x9.5 мм, сапфировой пластины для установки образца и оптического окна в боковой стенке волновода.



a)



b)

Рис. 5.5. (а) Волноводная измерительная камера. На эскизе показан участок 19x9.5 мм волновода (1). Волноводная секция нагружена двумя коаксиально-волноводными переходами (2), а также монтажную пластину для образца (3) в центре. Когда образец (4) установлен на монтажной пластине (3), то образец оказывается внутри волновода, напротив оптического окна (5). (б). Измеренные (сплошная линия) и смоделированные в HFSS (пунктирная линия) коэффициенты передачи и отражения тестовой камеры.

Волновод показан на рисунке 5.5а, волновод (1) с двумя коаксиально волноводными переходами (КВП) (2) и монтажной пластиной для образца (3). Оптическое окно находится в боковой стенке прямоугольного волновода (5). Окно (5) позволяет зондирующему лучу ЛСМ попадать в волновод, одновременно не препятствуя распространению радиочастотного сигнала. В волноводе образец (4) приклеивается к монтажной пластине из сапфира (3) в вертикальной плоскости симметрии волновода, обращенной к оптическому окну в боковой стенке (5). Сапфир был выбран для установки образца из-за его хорошей теплопроводности.

Разработанная волноводная тестовая камера позволяет исследовать однородность ВЧ-отклика отдельных СКВИДов массива при помощи лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ). Связь с оптикой лазерного микроскопа осуществляется через небольшое круглое отверстие в узкой стенке волновода, диаметр которого много меньше длинны волны ВЧ сигнала.

Фотография изготовленной тестовой камеры показана на рисунке 5.6. Тестовая камера состоит из корпуса и крышки, изготовленных из меди; двух СВЧ разъемов SMA; двух фторопластовых втулок, надетых на центральные проводники разъемов и сапфировой пластины, на которую устанавливается образец. Измерение СВЧ характеристик тестовой камеры производилось при помощи ВАЦ, используя измерительную установку, показанную на рисунке 5.7. Рассчитанные в HFSS и измеренные коэффициенты передачи и отражения тестового волновода изображены на рисунке 5.5б. На рисунке видно, что экспериментальные и расчетные кривые хорошо совпадают друг с другом. В полосе 8.5-15.5 ГГц коэффициент передачи S21 достаточно высок, чтобы обеспечить низкий уровень стоячих волн в волноводе, и позволяет использовать тестовую камеру для измерения двумерных сверхпроводящих метаматериалов.

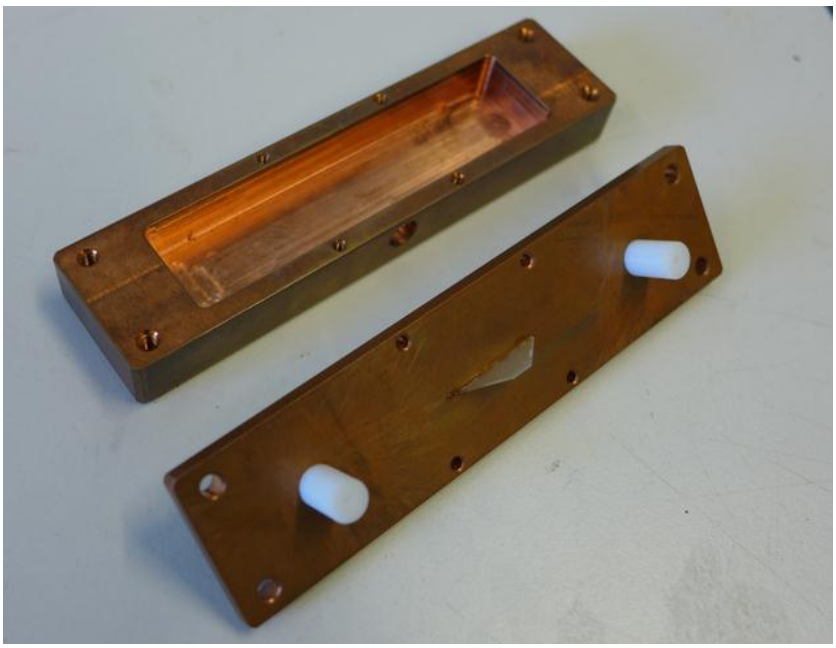


Рис. 5.6. Фотография тестовой камеры для исследования двумерных метаматериалов.

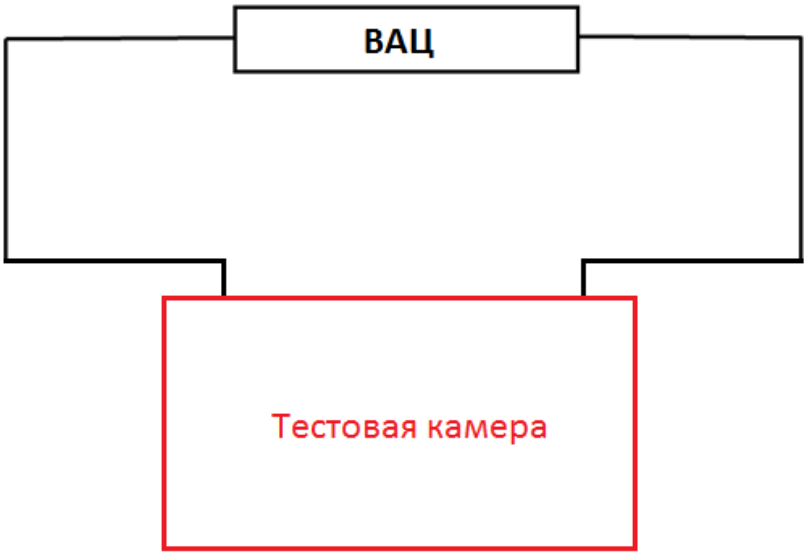


Рис. 5.7. Схема измерительной установки для измерения СВЧ характеристик тестовой камеры. Векторный анализатор цепей (ВАЦ) подключен к коаксиально волноводным переходам (КВП) тестовой камеры двумя коаксиальными кабелями.

5.4. Экспериментальное исследование отклика двумерного массива СКВИДов в зависимости от постоянного магнитного поля.

Для измерения отклика двумерного массива СКВИДов от частоты СВЧ сигнала и от постоянного магнитного поля была собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 5.8. Образец массива СКВИДов установлен внутри измерительной камеры, которая выполнена в виде отрезка прямоугольного волновода, нагруженного двумя коаксиально-волноводными переходами (КВП). Конструкция измерительной камеры подробно описана в разделе 4.3. Измерительная камера установлена внутри магнитного экрана, изготовленного из пермаллоя. Коаксиально волноводные переходы камеры соединены с векторным измерителем цепей (ВАЦ) коаксиальными кабелями. Криогенный малошумящий усилитель СВЧ мощности LNF-LNC6_20A [40] установлен внутри криостата между выходом измерительной камеры и ВАЦ.

Фотография криостата с открытой крышкой показана на рисунке 5.9.

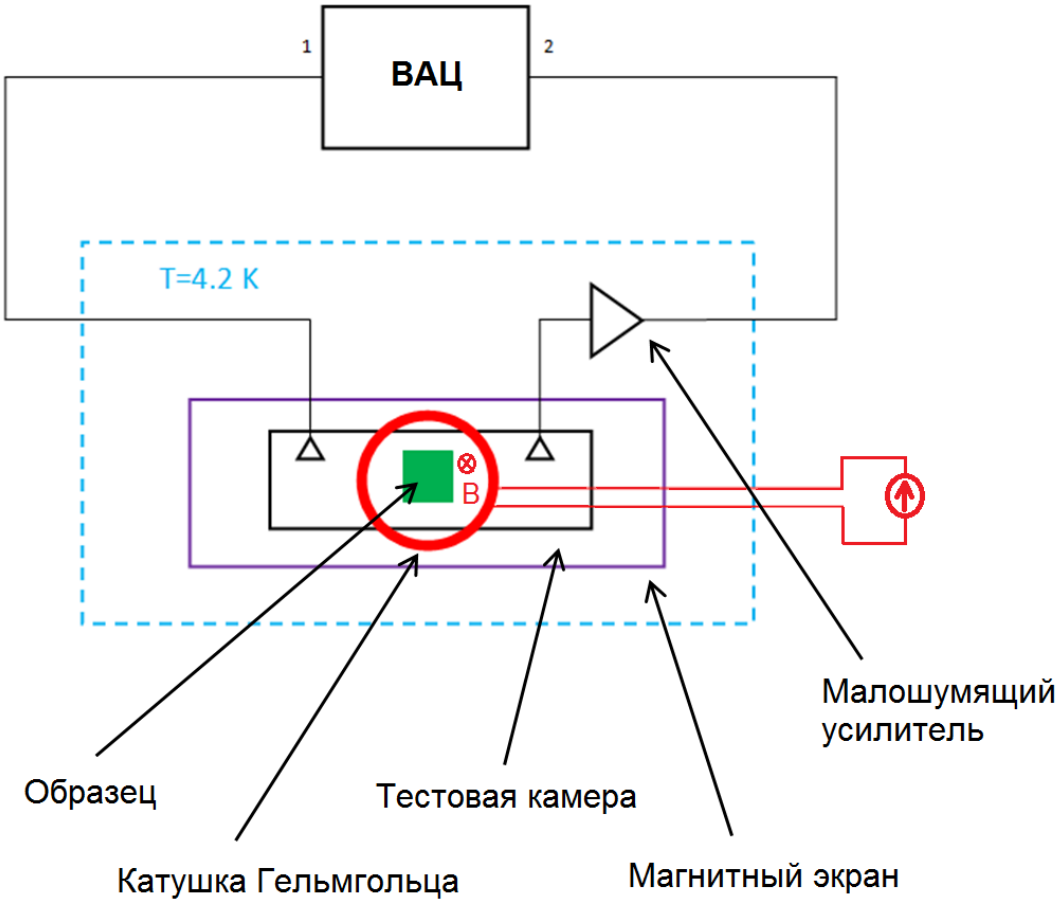


Рис. 5.8. Схема измерительной установки для измерения 2D массива СКВИДов. Образец массива установлен внутри измерительной камеры, которая выполнена в виде отрезка прямоугольного волновода, нагруженного двумя коаксиально-волноводными переходами (КВП). Коаксиально волноводные переходы соединены с ВАЦ и усилителем СВЧ мощности при помощи коаксиальных кабелей. Постоянное магнитное задавалось на образце перпендикулярно плоскости СКВИДов при помощи магнитной катушки Гельмгольца, установленной снаружи измерительной камеры и внутри магнитного экрана. Постоянный ток подавался на магнитную катушку от источника тока

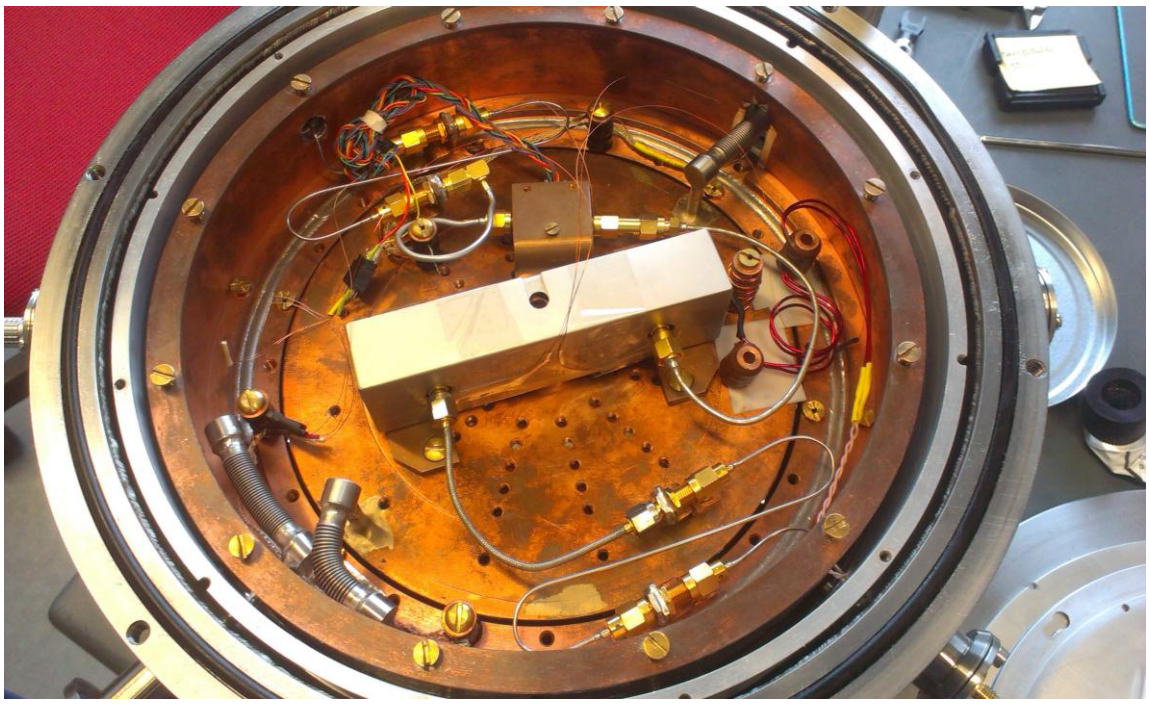


Рис. 5.9. Фотография открытого криостата, в котором производились измерения 2D массива СКВИДов. Измерительная камера внутри магнитного экрана (в центре) с отверстием для луча ЛСМ. К СВЧ выходам камеры подключены 2 коаксиальных кабеля. Криогенный малошумящий усилитель СВЧ мощности LNF-LNC6_20A (выше камеры) установлен внутри криостата при помощи медного монтажного уголка между выходом измерительной камеры и ВАЦ.

При проведении эксперимента криостат охлаждался жидким гелием до температуры T=4.2 K. Измеренный коэффициент передачи S21 через тестовую камеру в зависимости от частоты радиосигнала и магнитного поля показан на рисунке 5.10. Уровень мощности зондирующего радиосигнала установлен достаточно низким (-70 дБм), чтобы получить линейный отклик (независимый от мощности радиосигнала). Данные S21 нормированы относительно передачи при температуре T=10 K, выше критической температуры Nb. На резонансной частоте поглощение СКВИДов видно как темные области. На рис. 5.10 вся матрица СКВИДов имеет синхронный отклик, без каких-либо дополнительных ветвей (паразитных резонансов),

также как и для одиночного СКВИДа, с периодическим изменением резонансной частоты в зависимости от магнитного поля. Продемонстрирована возможность перестройки резонансной частоты матрицы 21X21 СКВИДов в диапазоне 8-12.5 ГГц.

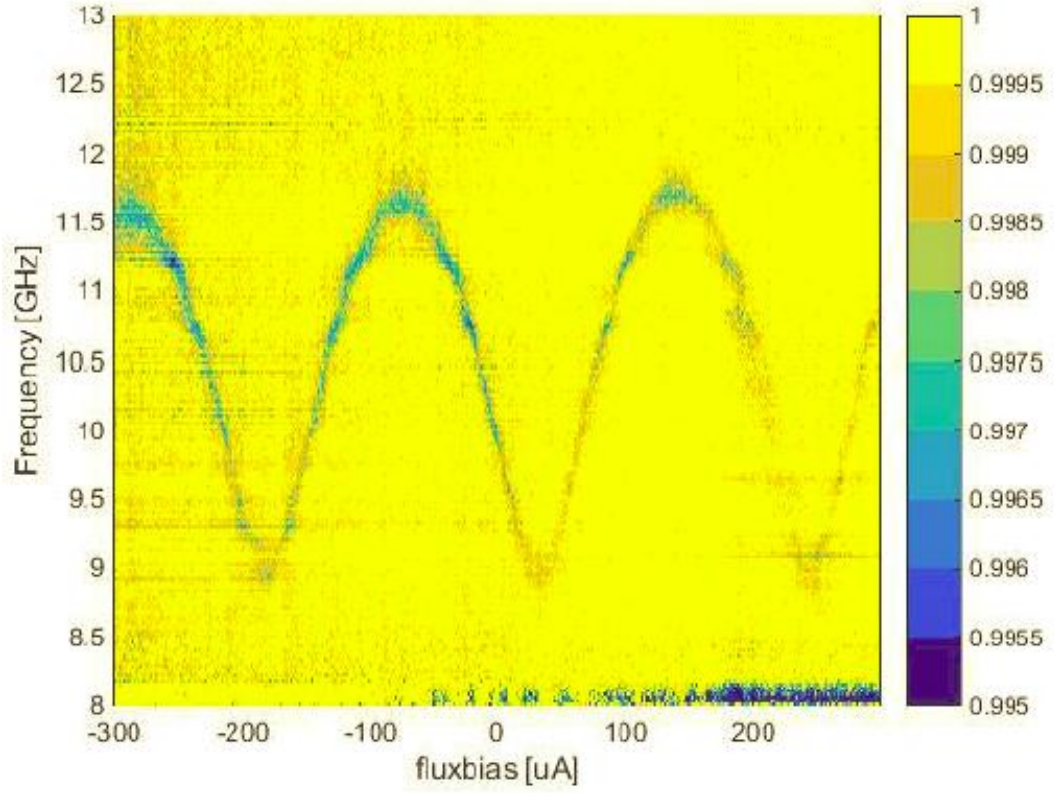


Рис. 5.10. Измеренный отклик массива 21X21 ВЧ СКВИДов при температуре T=4.2 К в зависимости от частоты и от постоянного магнитного поля. Коэффициент передачи через экспериментальную установку показан цветом: высокий S21 (яркий цвет), низкий S21 (темный цвет).

5.5. Экспериментальное исследование распределения СВЧ токов на двумерном массиве ВЧ-СКВИДов.

Мы использовали лазерный сканирующий микроскоп (ЛСМ) для пространственного разрешения резонансного отклика отдельных СКВИДов, являющихся мета-атомами в образце 2D метаматериала.

Для измерения распределения СВЧ токов 2D массива СКВИДов была разработана экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 5.11. При проведении измерений распределений ВЧ тока лазерный луч ЛСМ проходил через оптическое окно в верхней крышке криостата, далее сквозь отверстие в магнитном экране и через отверстие в боковой стенке измерительной камеры попадал на образец. Одновременно с лазерным лучом на образец подается зондирующий СВЧ сигнал. Лазерный луч генерирует локальные квазичастицы, вызывая потери СВЧ сигнала (δS21). На выходе из криостата амплитуда СВЧ сигнал регистрируется детекторным диодом. Наведенные потери (δS21) пропорциональны локальной амплитуде ВЧ-тока. Сканируя образец лазерным лучом, мы получаем карту распределения амплитуды ВЧ тока на образце.

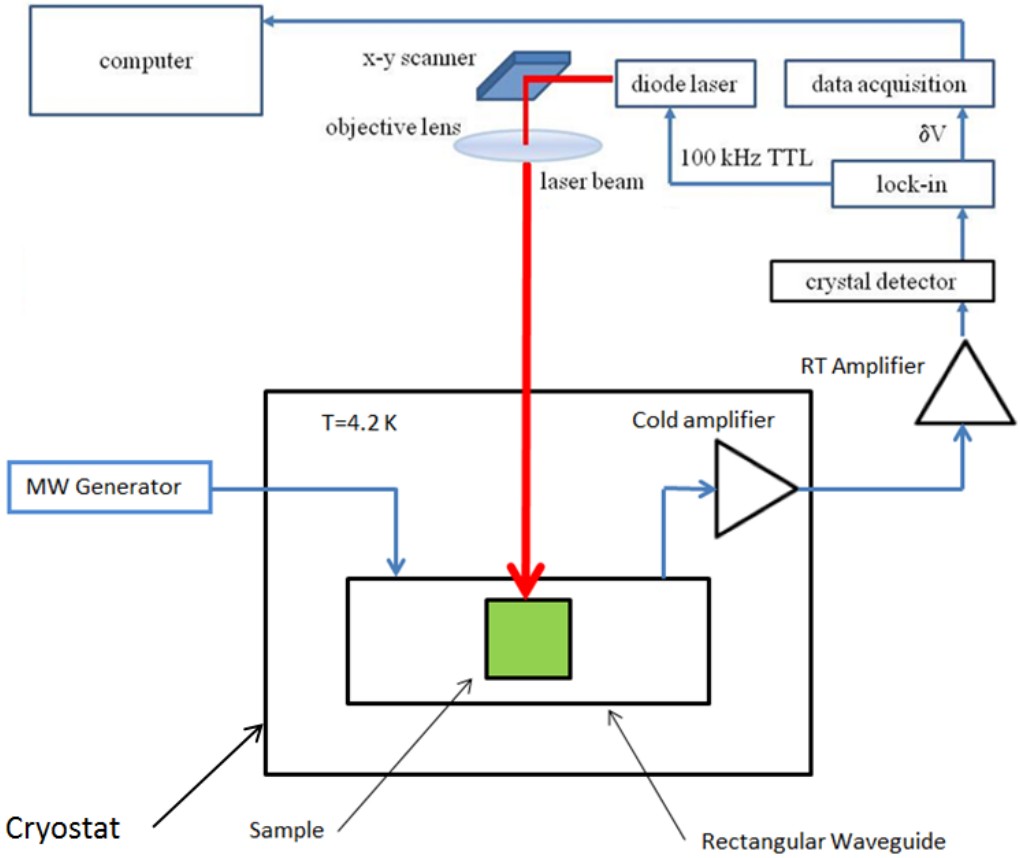


Рис. 5.11. Схема экспериментальной установки Лазерного Сканирующего микроскопа (ЛСМ).

Изображение ЛСМ получено как изменение коэффициента передачи (δS21) через прямоугольный волновод с установленным в нем образцом массива СКВИДов в зависимости от положения лазерного луча на образце (δS21(x,y)). Поскольку лазерный луч подогревает сверхпроводник локально, и поскольку уровень воздействия зависит от локального уровня ВЧ тока, полученное изображение ЛСМ дает 2D-график ВЧ токов в образце на фиксированной радиочастоте (рис. 5.12а,б) [10, 40]. Измерение выполняется на фиксированной частоте, близкой к максимальной резонансной частоте СКВИДов. На рис. 5.12а,б яркие области соответствуют сильному ЛСМ отклику (больше потерь от лазерного луча) с более высокой плотностью тока, тогда как темные области соответствуют областям с низкой плотностью ВЧ тока или областям без сверхпроводника. ВЧ отклик существенно изменяется по массиву СКВИДов. Два темных пятна в центре (без ВЧ токов), вероятно, будут двумя дефектными СКВИДами. Можно отметить около 50% СКВИДов в массиве, участвуют в резонансе (яркий цвет).

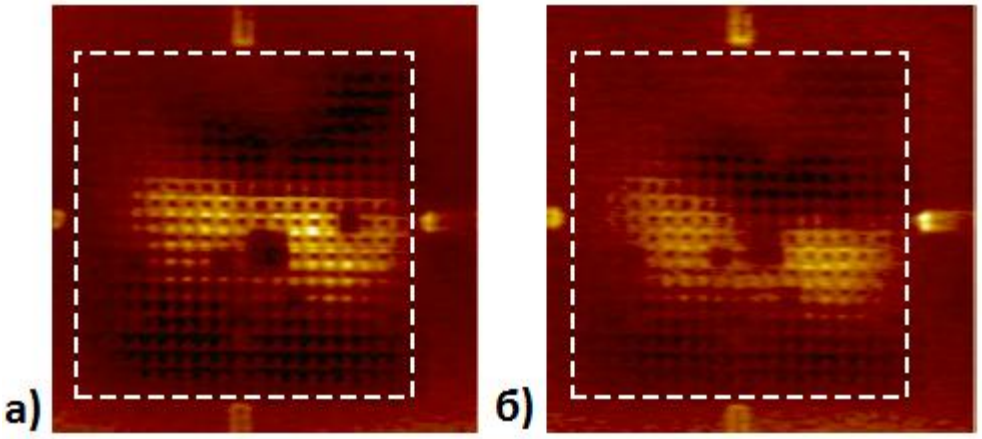


Рис. 5.12. Изображения распределений ВЧ-токов в массиве 21X21 ВЧ СКВИДов, измеренные на ЛСМ на частоте близкой к максимальной резонансной частоте СКВИДов. (а), (б) данные ЛСМ при Fmax - два независимых измерения. Амплитуда ЛСМ отклика кодирована: яркий цвет соответствуют максимальной амплитуде ВЧ тока. Пунктирная линия показывает границу массива СКВИДов, около 1x1 мм.

5.6. Заключение.

Измерен отклик двумерного массива 21x21 ВЧ СКВИДов в прямоугольном волноводе, предназначенном для достижения равномерного воздействия ВЧ сигнала на массив. Измеренная перестройка резонансной частоты 2D массива СКВИДов внешним магнитным полем составляет около 56%, покрывая диапазон 8-12.5 ГГц. Изображения распределений ВЧ тока на массиве СКВИДов, полученные на ЛСМ, подтверждают высокую степень когерентности всей мета-поверхности. Мета-поверхности на основе СКВИДов, сочетающие низкие потери и частотную перестройку, могут быть полезны для проектирования компактных криогенных радиочастотных систем.

Заключение

1. Проведено исследование электродинамики плоского спирального резонатора, изготовленного в виде спирали Архимеда. Резонансные частоты спирали Архимеда рассчитаны численно в программе HFSS методом конечных элементов. Получены зависимости амплитуд токов от радиуса спирального резонатора на резонансных частотах. Результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них хорошо совпадают с аналитическими расчетами и экспериментом.

2. Проведено исследование кольцевого спирального резонатора. Проведен численный расчет методом конечных элементов модели кольцевой спирали в программе HFSS. Резонансные частоты спирали вычислены в программе HFSS двумя методами: Drivenmodal и Eigenmode. Показано, что резонансные частоты кольцевого спирального резонатора следуют соотношению: 1:3:5:7... , при отношении внутреннего радиуса спирали к внешнему от 0.7 до 1. Численно рассчитанные резонансные частоты хорошо совпадают с аналитическим расчетом и экспериментом.

3. Предложен и исследован сверхпроводящий резонатор на двойной спирали. Численно рассчитаны резонансные частоты и распределения токов на них. В эксперименте на лазерном сканирующем микроскопе (ЛСМ) измерены резонансные частоты сверхпроводящего Nb резонатора и структура его внутренних мод. Результаты численного расчета резонансных частот и распределений токов на них хорошо совпали с экспериментом.

4. Исследован ультра-компактный спиральный резонатор на двойной спирали в интегральном исполнении. Выполнен численный расчет резонансных частот спирального резонатора на двойной спирали в программе в HFSS. Рассчитана зависимость резонансной частоты первой моды от расстояния между спиралями для резонатора на двойной спирали. Рассчитанные резонансные частоты хорошо совпали с экспериментом.

Достигнутый диаметр ультра-компактного резонатора относительно длинны волны D=λ/14400.

5. Разработан и испытан держатель образцов для проведения широкополосных СВЧ измерений образцов при криогенных температурах. В держателе образцов отсутствуют паразитные СВЧ резонансы в диапазоне частот от 0 до 32 ГГЦ.

6. Измерен отклик двумерного массива 21x21 ВЧ СКВИДов в прямоугольном волноводе, предназначенном для достижения равномерного воздействия СВЧ сигнала на массив. Измеренная перестройка резонансной частоты 2D массива СКВИДов внешним магнитным полем составляет около 56%, покрывая диапазон 8-12.5 ГГц. Изображения распределений СВЧ тока на массиве ВЧ-СКВИДов, полученные на ЛСМ, подтверждают высокую степень когерентности всей метаповерхности.

Компактные резонаторы на основе одиночных и двойных спиралей могут найти применение в качестве элементов сверхпроводящих СВЧ фильтров [67], сверхпроводящих резонаторов для считывания состояния квантовых битов [13, 59-63, 65], резонаторов для сверхпроводящих болометров [18]. Кроме того, компактные спиральные резонаторы могут быть использованы в системах беспроводной передачи энергии [26, 68, 69], для создания антенн для магнитно-резонансной томографии [27] и для создания трехмерных спиральных метаматериалов [70]. Полученные результаты коллективного отклика массива СКВИДов могут быть использованы при измерении мульти-стабильных [31, 44] и "химерных" состояний [45, 46] в двумерных и трехмерных сверхпроводящих метаматериалах. Разработанный держатель образцов для проведения широкополосных СВЧ измерений при криогенных температурах может быть использован для измерения сверхпроводящих квантовых битов [13], сверхпроводящих болометров [18], криогенных параметрических усилителей [19, 51-55] и образцов СВЧ сверхпроводящих метаматериалов [21, 10].

Список публикаций

A1. A. S. Averkin, A. Karpov, A. P. Zhuravel, L.V. Filippenko, V. P. Koshelets, S.M. Anlage, and A.V. Ustinov, Superconductive Ultra-compact Magnetically Coupled Resonator with Twin-spiral Structure// IEEE Transactions on Applied Superconductivity —2017. —VOL. 27. —NO. 4.

A2. Averkin A.S., Zhuravel A.P., Jung P., Maleeva, N., Koshelets, V.P., Filippenko L.V., Karpov, A., Ustinov A.V, Imaging coherent response of superconducting metasurface// Applied Superconductivity, IEEE Transactions on —2016. —VOL. 26. — NO. 3.

A3. N. Maleeva, A. Averkin, N. N. Abramov, M. V. Fistul, A. Karpov, A. P. Zhuravel and A. V. Ustinov, Electrodynamics of planar Archimedean spiral resonator// J. Appl. Phys. —2015. —VOL. 118. —033902.

A4. A. S. Averkin, A. Karpov, K. Shulga, E. Glushkov, N. Abramov, U. Huebner, E. Il'ichev, and A. V. Ustinov , Broadband sample holder for microwave spectroscopy of superconducting qubits// Rev. Sci. Instrum. —2014. —VOL. 85. —104702.

A5. N. Maleeva, M. V. Fistul, A. Karpov, A. P. Zhuravel, A. Averkin, P. Jung, and A. V. Ustinov, Electrodynamics of a ring-shaped spiral resonator// J. Appl. Phys. —2014. —VOL. 11. —5064910.

A6. E. Ovchinnikova, S. Butz, P. Jung, V. P. Koshelets, L. V. Filippenko, A. S. Averkin, S. V. Shitov and A. V. Ustinov, Design and experimental study of superconducting left-handed transmissionm lines with tunable dispersion// Supercond. Sci. Technol. —2013. —VOL. 26.

A7. I. A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov, I. V. Shchetinin, P. S. Dzhumaev, A. S. Averkin, S. N. Kozlov, A. A. Golubov, V. V. Ryazanov, and A. V. Ustinov, Probing dynamics of micro-magnets with multi-mode superconducting resonator// J. Appl. Phys. —2018. —VOL. 123 —173904.

Список сокращений и обозначений

ВЧ – высокая частота;

ВЧ-СКВИД – высокочастотный сверхпроводящий квантовый интерферометр;

КВП – коаксиально волноводный переход;

ЛСМ – лазерный сканирующий микроскоп;

ПТ-СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерферометр на постоянном токе;

СВЧ – верх высокая частота;

СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерферометр;

ЭМ – Электромагнитный;

HFSS – симулятор высокочастотных структур (англ. High Frequency Structure Simulator);

HEMT – high electron mobility transistor.

Список используемой литературы

1. Engheta, Nader (англ.); Ziolkowski, Richard W. Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. — John Wiley & Sons & IEEE Press, 2006. — стр. xv,— 440 p. — ISBN 978-0-471-76102-0.

2. Н. Ашкрофт, Н. Мермин “Физика твердого тела”, Москва, изд-во Мир, (1979), 2 том, стр. 340.

3. V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ”, Sov. Phys. Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, 1968.

4. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 47, pp. 2075-2084, Nov. 1999.

5. D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, “Composite with simultaneously negative permeability and permittivity”, Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.

6. J. D. Baena, R. Marques, and F. Medina, “Artificial magnetic meta-material design by using spiral resonators,” Phys. Rev. B, vol. 69, p.014402, Jan. 2004.

7. S. Massaoudi and I. Huynen, “Multiple resonances in arrays of spiral resonators designed for magnetic resonance imaging,” Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 50, pp. 1945–1950, Jul. 2008.

8. W.-C. Chen, C. M. Bingham, K. M. Mak, N. W. Caira, and W. J. Padilla, “Extremely subwavelength planar magnetic metamaterials”, Phys. Rev. B, vol. 85, 201104(R), 2012.

9. S. M. Anlage “The physics and applications of superconducting metamaterials”, J. Opt., Vol. 13, 024001, 2011

10. C. Kurter, A. P. Zhuravel, J. Abrahams, C. L. Bennett, A. V. Ustinov, and S. M. Anlage “Superconducting RF Metamaterials Made With Magnetically

Active Planar Spirals” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, pp. 709–712, June 2011.

11. Behnood G. Ghamsari, John Abrahams, Stephen Remillard, and Steven M. Anlage, “High-Temperature Superconducting Spiral Resonator for Metamaterial Applications”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 23, NO. 3, (2013)

12. S. Butz, P. Jung, L. V. Filippenko, V. P. Koshelets, and A. V. Ustinov, "A one-dimensional tunable magnetic metamaterial", OPTICS EXPRESS 22540, (2013).

13. M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, E. Il’ichev, and A. V. Ustinov, “Frequency division multiplexing readout and simultaneous manipulation of an array of flux qubits”, Appl. Phys. Lett. 101, 042604 (2012).

14. P. Day, H. Leduc, B. Mazin, A. Vayonakis, and J. Zmuidzinas, “A superconducting detector suitable for use in large arrays,” Nature 425, 817–821 (2003).

15. Benjamin A. Mazin, Bruce Bumble, Seth R. Meeker, Kieran O’Brien, Sean McHugh, and Eric Langman "A superconducting focal plane array for ultraviolet, optical, and near-infrared astrophysics", Vol. 20, No. 2, OPTICS EXPRESS 1503, (2012).

16. Annunziata AJ, Santavicca DF, Frunzio L, Catelani G, Rooks MJ, Frydman A, Prober DE, "Tunable superconducting nanoinductors", Nanotechnology, 21(44):445202 (2010).

17. Cihan Kurter, Alexander P. Zhuravel, Alexey V. Ustinov, and Steven M. Anlage, "Microscopic examination of hot spots giving rise to nonlinearity in superconducting resonators", Phys. Rev. B 84, 104515, (2011).

18. G. N. Gol’tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and Roman Sobolewski, “Picosecond superconducting single-photon optical detector”, Appl. Phys. Lett. 79, 705 (2001).

19. Kevin O'Brien, Chris Macklin, Irfan Siddiqi, and Xiang Zhang, "Resonant Phase Matching of Josephson Junction Traveling Wave Parametric Amplifiers", PRL 113, 157001, (2014).

20. I. A. Golovchanskiy, N. N. Abramov, V. S. Stolyarov, I. V. Shchetinin, P. S. Dzhumaev, A. S. Averkin, S. N. Kozlov, A. A. Golubov, V. V. Ryazanov, and A. V. Ustinov, "Probing dynamics of micro-magnets with multi-mode superconducting resonator", J. Appl. Phys., VOL. 123, 173904, (2018).

21. Philipp Jung, Alexey V Ustinov, and Steven M Anlage, "Progress in superconducting metamaterials", Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) 073001 (13pp).

22. ANSYS HFSS at www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss

23. Triton at www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments

24. R&S at www.rohde-schwarz.com/us/product/zvb-productstartpage_63493-7990.html

25. A. P. Zhuravel, A. G. Sivakov, O. G. Turutanov, A. N. Omelyanchouk, S. M. Anlage, and A. V. Ustinov, "Laser scanning microscope for HTS films and devices," Low Temp. Phys., vol. 32, p. 592, Jun. 2006.

26. Giovanni Puccetti *, Ugo Reggiani and Leonardo Sandrolini " Experimental Analysis of Wireless Power Transmission with Spiral Resonators", Energies 2013, 6, 5887-5896; doi:10.3390/en6115887

27. Ramaswamy V, Hooker JW, Withers RS, Nast RE, Edison AS, Brey WW. Microsample cryogenic probes: technology and applications. eMagRes. Jun.2013 2:215–228.

28. Steven M. Anlage, "The Physics and Applications of Superconducting Metamaterials," J. Opt. 13, 024001 (2011).

29. Lazarides N and Tsironis G P, "RF superconducting quantum interference device metamaterials" Appl. Phys. Lett. 90 163501, (2007).

30. Maimistov A I and Gabitov I R 2010 "Nonlinear response of a thin metamaterial film containing Josephson junctions" Opt. Commun. 283 1633–9

31. Lazarides N and Tsironis G P “Multistability and selforganization in disordered SQUID metamaterials” Supercond. Sci. Technol. 26 084006 (2013).

32. M. Trepanier, Daimeng Zhang, Steven M. Anlage, Oleg Mukhanov, “Realization and Modeling of Metamaterials Made of rf Superconducting Quantum-Interference Devices,” Phys. Rev. X 3, 041029 (2013).

33. A. P. Zhuravel, Steven M. Anlage, and A. V. Ustinov, "Imaging of Microscopic Sources of Resistive and Reactive Nonlinearities in Superconducting Microwave Devices", IEEE Trans. on Appl. Supercond., 17, Issue 2, pp. 902 - 905 (2007).

34. John Clarke & Frank K. Wilhelm, "Superconducting quantum bits", Nature vol. 453, pages 1031–1042 (2008).

35. A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.- S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin & R. J. Schoelkopf, "Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics", Nature vol. 431, pages162–167 (2004).

36. Pascal Macha, Gregor Oelsner, Jan-Michael Reiner, Michael Marthaler, Stephan André, Gerd Schön, Uwe Hübner, Hans-Georg Meyer, Evgeni Il’ichev, Alexey V. Ustinov, " Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits", Nature Communications, vol. 5, Article number: 5146 (2014).

37. K. V. Shulga, E. Il’ichev, M. V. Fistul, I. S. Besedin, S. Butz, O. V. Astafiev, U. Hübner & A. V. Ustinov, " Magnetically induced transparency of a quantum metamaterial composed of twin flux qubits", Nature Communications, Vol. 9, Article number: 150 (2018).

38. K. K. Likharev, Dynamics of Josephson Junctions (Gordon and Breach Science, 1991).

39. M. Tinkham, “Introduction to Superconductivity” (2nd Edition), (Dover Publications Inc., 2004).

40. Alexander P. Zhuravel, Cihan Kurter, Alexey V. Ustinov, and Steven M. Anlage “Unconventional RF photoresponse from a superconducting spiral resonator”, Phys. Rev. B, 85, 134535 (2012).

41. www.lownoisefactory.com

42. “Введение в Физику сверхпроводников”, В. В. Шмидт. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2000.

43. M. Tinkham, “Introduction to Superconductivity (Second Edition)”, Dover Publications Inc. (2004)

44. P Jung, S Butz, M Marthaler, MV Fistul, J Leppäkangas, VP Koshelets, AV Ustinov, “Multistability and switching in a superconducting metamaterial”, Nature communications 5, 2014

45. N. Lazarides, G. Neofotistos, and G. P. Tsironis "Chimeras in SQUID metamaterials", Phys. Rev. B 91, 054303 – Published 3 February 2015

46. J. Hizanidis, N. Lazarides, G. Neofotistos, G.P. Tsironis, "Chimera states and synchronization in magnetically driven SQUID metamaterials", The European Physical Journal Special Topics (2016), Volume 225, Issue 6–7, pp 1231–1243

47. D. Russell, K. Cleary, and R. Reeves, Rev. Sci. Instrum. 83, 044703 (2012).

48. Lake Shore EMPX-HF Probe Station, Lake Shore Cryotronics Inc., Ohio 43082, USA.

49. J. M. Hornibrook, E. E. Mitchell, and D. J. Reilly, IEEE Trans. Appl. Supercond. 23, 3 (2013).

50. J. M. Chow, Ph.D. thesis (Yale University, 2010), p. 120.

51. I. Siddiqi, R. Vijay, F. Pierre, C. M. Wilson, M. Metcalfe, C. Rigetti, L. Frunzio and M. H. Devoret, Phys. Rev. Lett. 93(20), 207002-1–207002-4 (2004).

52. M. A. Castellanos-Beltran and K.W. Lehnert, Appl. Phys. Lett. 91, 083509 (2007).

53. T. Yamamoto, K. Inomata, M. Watanabe, K. Matsuba, T. Miyazaki, W. D. Oliver, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, Appl. Phys. Lett. 93, 042510 (2008).

54. B. Abdo, K. Sliwa, L. Frunzio, and M. Devoret, Phys. Rev. X 3, 031001 (2013).

55. M. Rehák, P. Neilinger, M. Grajcar, G. Oelsner, U. Hübner, E. Il'ichev, and H.-G. Meyer, Appl. Phys. Lett. 104, 162604 (2014).

56. P. K. Day, H. G. Leduc, B. A. Mazin, A. Vayonakis and J. Zmuidzinas, Nature (London) 425, 817 (2003).

57. M. Calvo, M. Roesch, F.-X. Désert, A.Monfardini, A. Benoit, P. Mauskopf, P. Ade, N. Boudou, O. Bourrion, P. Camus, A. Cruciani, S. Doyle, C. Hoffmann, S. Leclercq, J. F. Macias-Perez, N. Ponthieu, K. F. Schuster, C. Tucker and C. Vescovi, Astron. Astrophys. 521, A29 (2010).

58. A. A. Kuzmin, S. V. Shitov, A. Scheuring, J. M. Meckbach, K. S. Il'in, S. Wuensch, A. V. Ustinov, and M. Siegel, IEEE Trans on Terahertz Science and Technology 3(1), 25–31 (2013).

59. M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, A. Lukashenko, E. Il'ichev, and A. V. Ustinov, Europhys. Lett. 96, 40012 (2011).

60. E. Il'ichev, N. Oukhanski, Th. Wagner, H.-G. Meyer, A. Yu Smirnov, M. Grajcar, A. Izmalkov, D. Born, W. Krech, and A. Zagoskin, Low Temp. Phys. 30, 620 (2004).

61. A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, Nature (London) 431, 162 (2004).

62. J. Majer, J. M. Chow, J. M. Gambetta, Jens Koch, B. R. Johnson, J. A. Schreier, L. Frunzio, D. I. Schuster, A. A. Houck, A.Wallraff, A. Blais, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, Nature (London) 449, 443 (2007).

63. L. DiCarlo, M. D. Reed, L. Sun, B. R. Johnson, J. M. Chow, J. M. Gambetta, L. Frunzio, S. M. Girvin, M. H. Devoret, R. J. Schoelkopf et al., Nature (London) 467, 574 (2010).

64. N. Marcuvitz, Waveguide Handbook (Peter Peregrins Ltd., London, 1993), p. 56.

65. J. Clarke and F. K. Wilhelm, Nature (London) 453, 1031–1042 (2008).

66. M. Jerger, S. Poletto, P. Macha, U. Hübner, E. Il'ichev, and A. V. Ustinov, Appl. Phys. Lett. 101(4), 042604 (2012).

67. M. R. Rafique, T. Ohki, B. Banik, H. Engseth, P. Linner and A. Herr, "Miniaturized superconducting microwave filters", Supercond. Sci. Technol. 21, (2008) 075004 (7pp)

68. Gaorong Qian, Guoxiong Chen, Gaofeng Wang, Yuhua Cheng. Experimental study of wireless power transfer with metamaterials and resonators. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 58:1, 27-39 (2018).

69. Yuhua Cheng, Dongdong Xuan, Xiang Su, Wei Wu, Gaofeng Wang. (2018) An optimal operating frequency selection scheme for maximizing inductive power link efficiency. Microwave and Optical Technology Letters60:3, 625-629.

70. C. Kurter, T. Lan, L. Sarytchev, Steven M. Anlage. (2015) Tunable Negative Permeability in a Three-Dimensional Superconducting Metamaterial. Physical Review Applied 3:5.

71. "An Introduction to HFSS". 1st Edition ANSYS published January 20, 2010 (2009) pp. 1-1-16.

72. M. Jerger Ph. D. thesis "Experiments on Superconducting Qubits Coupled to Resonators".

73. M. Najjarzadegan, I. Ghotbi, P. Bassirian, S. Jafarabadi Ashtiani, O. Shoaei, M. Shahabadi "Distributed‐element modelling for spiral resonators used in wireless power transfer", Int J Circ Theor Appl. 2018; 46:313‐327.