

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ИФТТ РАН



А.А. Левченко

19 ноября 2018 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию А.С. Аверкина
«Ультракомпактные сверхпроводящие резонаторы
для построения электромагнитных метаматериалов»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Активное развитие в последние 15-20 лет криогенных приемных устройств, сверхпроводниковых детекторов, элементов цифровой и квантовой сверхпроводниковой логики связано с успехами фундаментальной физики сверхпроводимости, разработкой компактной криогенной техники, а также с созданием новых технологий тонкопленочных структур с микронными и субмикронными размерами. Одно из современных направлений фундаментальной и прикладной физики сверхпроводимости связано с реализацией сверхпроводящих метаматериалов – искусственных сред с необычными подстраиваемыми электромагнитными свойствами. Настоящая диссертация посвящена проектированию, расчетам и экспериментальному исследованию компактных сверхпроводниковых резонаторов для сверхпроводящих метаматериалов. Обсуждаемые и исследованные в диссертации структуры также перспективны в однофотонных детекторах, антеннах, приемниках микроволновых излучений, фильтрах и других СВЧ-устройствах. Разработка таких структур требует изучения новых аспектов фундаментальной электродинамики сверхпроводников, особенностей взаимодействия электромагнитного излучения со сверхпроводниками. Таким образом, тема диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключение, она основана на 7 научных работах, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, а также трудах международной конференции. Во Введении дан общий анализ актуальности реализации электромагнитных метаматериалов и использования в них сверхпроводящих резонаторов, определены задачи и цели выполненных в диссертации исследований, а также их научная и практическая ценность, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы по различным типам метаматериалов, а также по теоретическим и экспериментальным методам, используемым для исследования метаматериалов и резонаторов. Особое внимание уделено обсуждению сверхпроводящих метаматериалов, а также сверхпроводящих микро-резонаторов и скин-эффектов как элементов таких метаматериалов. Описаны их преимущества, связанные с возможностью уменьшения размеров элементов («мета-атомов»), уменьшением диссипации в рабочей (резонансной) области частот, контролируемой перестройкой резонансных частот. Отдельный раздел посвящен

обсуждению работы лазерного сканирующего микроскопа (ЛСМ), использованного в диссертационной работе для измерения распределений СВЧ токов в сверхпроводящих микро-резонаторах. Последний «обзорный» раздел первой главы посвящен описанию работы программы трехмерного электромагнитного моделирования High Frequency Structure Simulator (HFSS), которая применялась при численных расчетах распределений токов и электромагнитных полей в изучаемых структурах. Литературный обзор, представленный в этой главе, завершается постановкой задач диссертации.

Глава 2 диссертации посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям электродинамики спиральных резонаторов. В первой половине этой главы представлены исследования плоской спирали Архимеда. В программе HFSS было выполнено моделирование спирали Архимеда, размещенной между двумя возбуждающими кольцами. Соответствие рассчитанных резонансных характеристик и распределений высокочастотных токов резонансных мод характеристикам реальных резонаторов было проверено в эксперименте. Было показано, что собственные частоты резонатора зависят от длины спиральной линии и соотносятся как числа натурального ряда: 1:2:3... Распределения токов, рассчитанные численно, хорошо соответствовали наблюдаемым в экспериментах на основе использования лазерного сканирующего микроскопа. В диссертации представлены наглядные картины распределения токов нескольких резонансных мод, которые вполне удовлетворительно соответствуют рассчитанным характеристикам. Вторая половина Главы 2 посвящена исследованиям кольцевого спирального резонатора, представляющего собой плоскую спираль Архимеда без центральной части (в виде узкого кольца). В численных расчетах и на эксперименте наблюдалась нечетная зависимость собственных резонансных частот кольцевого спирального резонатора от числа n мод осцилляций тока: 1:3:5:7... при отношении внутреннего радиуса спирали к внешнему от 0.7 до 1. Таким образом, резонатор в виде спирали Архимеда и кольцевой спиральный резонатор являются двумя предельными случаями, соответствующими полуволновому и четвертьволновому резонаторам.

В Главе 3 представлены результаты исследования оригинального ультракомпактного резонатора, являющегося наложением двух спиралей, закрученных в противоположных направлениях. Эквивалентная схема такого резонатора на двойной спирали представляет собой периодически чередующиеся области с преимущественно емкостной связью и области с преимущественно индуктивной связью. В первом разделе Главы 3 на основе численного моделирования изучены спектральный отклик резонатора и электромагнитная структура его собственных мод. Во втором разделе этой главы экспериментально изучен такой резонатор в простейшем изготовлении, когда спирали были приготовлены на разных чипах и затем совмещены «лицом к лицу» на держателе. Было показано, что рассчитанные резонансные частоты согласуются с экспериментом с точностью лучше 6%. Рассчитанное распределение высокочастотных токов было подтверждено в экспериментах с лазерным сканирующим микроскопом для нескольких резонансных мод. Сильного уменьшения размеров резонатора на двойной спирали удалось достичь при его «интегральном» исполнении, когда резонатор изготавливался фотолитографическими методами на одной подложке. Близкое взаимное расположение спиралей, разделенных лишь тонким слоем диэлектрика, обеспечивало сильную емкостную связь и уменьшение частоты основной моды более чем в 20 раз по сравнению с одиночным резонатором. Это позволило получить рекордно малое отношение диаметра резонатора к длине волны его основной моды ($\sim 1/14400$). Таким образом, компактность такого резонатора, который может быть использован как «метатом» в метаматериалах на микроволновых частотах, близка к «компактности»

реальных атомов на соответствующих оптических частотах. Использованию двойных спиралей в магнитных метаматериалах способствует также то, что противоположная намотка спиралей позволяет резонатору взаимодействовать с магнитной компонентой электромагнитного поля, перпендикулярной плоскости резонатора. Были проведены подробные численные и экспериментальные исследования «интегральных резонаторов» на двойной спирали. В частности была изучена зависимость фундаментальной частоты от толщины диэлектрика, разделяющего две спирали. Численные расчеты неплохо соответствуют полученным экспериментальным результатам, как для частот собственных мод, так и для распределения высокочастотных токов.

В Главе 4 подробно обсуждается разработанный диссертантом криогенный держатель образцов для проведения микроволновых измерений микросхем при сверхнизких температурах. Главная проблема, которая возникает при использовании держателя с образцом, размещаемого в криостате, связана с тем, что полость над образцом в держателе является объемным резонатором со своими «паразитными» резонансными модами. Проектирование держателя связано с задачей уменьшения амплитуд этих мод и смещением их во вне частотной области измерений. В диссертации описана разработанная практическая конструкция держателя для измерения СВЧ характеристик в диапазоне частот 0-32 ГГц, обсуждаются методы предотвращения возбуждения высших мод и помех, связанных с ними. С помощью численного моделирования рассчитана рабочая полоса частот и выполнена экспериментальная проверка, полученных численных результатов. Показано, что разработанный держатель не имеет паразитных резонансов в диапазоне частот до 32 ГГц, а первый паразитный резонанс происходит на частоте 32.3 ГГц. В держатель можно устанавливать образцы (например, сверхпроводниковые болометры, параметрические усилители, кубиты) на подложке с размерами 4×4 мм² и задавать СВЧ сигналы, используя четыре копланарные передающие линии. Держатель был успешно испытан при измерении СВЧ характеристик джозефсоновского потокового кубита.

Последняя глава диссертации связана с исследованиями микроволнового отклика «мета-атомов» сверхпроводящей «мета-поверхности», образованной двумерным массивом высокочастотных скиннов (сверхпроводящих квантовых интерферометров). Высокочастотный (одноконтактный) скинн является джозефсоновским аналогом классического кольцевого резонатора с разрезом, использованного в качестве магнитной части «мета-атома» в первых экспериментах с электромагнитными метаматериалами. Вблизи резонансной частоты основной моды существует заметная область (10-15 % от резонансной частоты) с отрицательной магнитной проницаемостью, необходимой для реализации метаматериала с отрицательным показателем преломления. Преимущества «джозефсоновского мета-атома» связаны с меньшими потерями на рабочих (резонансных) частотах и возможностью перестройки этой частоты внешним магнитным полем. В Главе 5 диссертации представлено экспериментальное исследование микроволнового отклика отдельных мета-атомов сверхпроводящей мета-поверхности, образованной двумерным (21x21) массивом ВЧ-скиннов. Каждый ВЧ-скинн представлял собой тонкопленочную прямоугольную петлю (70 x 50 мкм²) из сверхпроводящего ниобия, замкнутую джозефсоновским переходом Nb/AlOx/Nb. Высокочастотные токи, возникающие на мета-поверхности, размещенной в специальном прямоугольном СВЧ-волноводе, были непосредственно измерены с помощью лазерного сканирующего микроскопа. Конструкция прямоугольного волновода с СВЧ-разъемом, сапфировым держателем образца, оптическим окном в боковой стенке и коаксиально-волноводными переходами в задней и передней стенках волновода была численно промоделирована. Была экспериментально изучена однородность ВЧ-отклика отдельных СКВИДов массива. Было показано, что

экспериментальные и расчетные кривые прохождения микроволнового сигнала хорошо совпадают друг с другом. Была продемонстрирована также возможность перестройки резонансной частоты массива ВЧ-сквидов в интервале 8-12.5 ГГц. Полученные изображения распределений высокочастотных токов в массиве, полученные с помощью лазерного сканирующего микроскопа подтвердили высокую степень когерентности мета-поверхности, в целом.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в работе теоретически и экспериментально исследованы новые типы компактных спиральных резонаторов и магнитных метаматериалов на основе спиральных резонаторов и сверхпроводящих квантовых интерферометров, развиты новые теоретические и экспериментальные приемы, проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано как на хорошем владении диссертантом расчетными методами, так и на использовании современных достижений технологии тонкопленочных структур и методов низкотемпературных микроволновых измерений.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. Чтение диссертации затрудняет отсутствие традиционной отдельной главы, посвященной использованным экспериментальным методикам. Так, отсутствует подробное описание методики лазерной сканирующей микроскопии, использованной, фактически во всех результативных главах, и представляющей отдельный интерес в качестве оригинального экспериментального метода. В первой главе (стр.28, рис. 1.11) дается лишь отрывочное описание этой методики, несколько более подробно методика обсуждается только в последней главе (стр. 105, Рис.5.11). Не обсуждаются сколь-нибудь детально СВЧ-измерения спиральных резонаторов. Например, даже не приведены диаметры возбуждающих катушек, параметры которых, как показано в эксперименте, влияют на частоту основной моды резонаторов.
2. Исследуемые структуры изготовлены на нескольких различных типах подложек: на кремниевых, кварцевых, керамических..., причем преимущества использования тех или иных подложек не обсуждаются.
3. Численные расчеты выполнены, фактически, для пленок из нормального металла с высокой проводимостью. Никак не обсуждается, насколько адекватно при таком подходе учитываются реальные сверхпроводящие свойства пленок (диамагнитное экранирование магнитных полей, кинетическая индуктивность и др.).
4. Экспериментальные исследования распределения высокочастотных токов с помощью лазерного микроскопа выполнены, фактически, для всех изучаемых структур кроме кольцевых резонаторов, где такие исследования также были бы, несомненно, полезны.
5. В тексте диссертации присутствуют стилистические недочеты и фактические опiski, на которые указано диссертанту. Например, как уже отмечалось выше, литературный обзор и описание некоторых экспериментальных и расчетных методов размещены в одной главе. Для лучшего отдельного восприятия литературных данных и оригинальной работы диссертанта удобнее было бы их разделить, тем более, что имеются повторы при описании методик в оригинальных главах.

Сделанные замечания, в основном, относятся к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

В целом диссертация выполнена и изложена на высоком уровне, она является цельным и законченным исследованием. Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Диссертация вносит существенный вклад в реализацию и исследования плоских спиральных резонаторов и магнитных метаматериалов. Практическая значимость работы связана с перспективами использования сверхпроводящих спиральных резонаторов в антеннах, приемниках СВЧ-излучений, сверхпроводящих метаматериалах. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, ИПТМ РАН г.Черноголовка, МГУ г. Москва, ИРЭ РАН, г. Москва, ФИ РАН г. Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных международных и российских семинарах и конференциях.

В целом, диссертационная работа «Ультракомпактные сверхпроводящие резонаторы для построения электромагнитных метаматериалов» удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, – Аверкин Александр Сергеевич, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- Физика конденсированного состояния.

Доклад по диссертационной работе заслушан на Семинаре по сверхпроводимости ИФТТ РАН, диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета ИФТТ РАН (протокол № 26 от 19 ноября 2018 года).

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник

Лаборатории сверхпроводимости

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института физики твердого тела Российской академии наук

(ИФТТ РАН), д. ф.-м. н., проф.

Л.Я. Винников

