



УТВЕРЖДАЮ"  
Директор ИФТТ РАН

чл.-корр. РАН В.В.Кведер

16 ноября 2015 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Н.А. Малеевой  
“Электродинамика сверхпроводящих метаматериалов на основе  
плоских спиральных резонаторов”,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук.

Новые перспективы в области криогенных приемных устройств и сверхпроводниковых детекторов, возникшие в последние 10-15 лет, связаны с развитием 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 сверхпроводящих метаматериалов на основе спиральных резонаторов. Такие структуры перспективны в 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, четырех глав и Заключения, она основана на 6 научных работах, опубликованных в международных физических журналах и трудах международных и российских конференций. Во Введении дан общий анализ актуальности создания и изучения электромагнитных метаматериалов, определены цели выполненных в диссертации исследований, а также их научная и практическая ценность, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору литературы по различным типам метоматериалов, а также описанию использованных в работе экспериментальных и теоретических методов. Особое внимание уделено обсуждению сверхпроводящих метаматериалов, работающих в микроволновом диапазоне длин волн. Описаны их преимущества, связанные с возможностью уменьшения размеров их элементов («мета-атомов»), уменьшением диссипации в рабочей (резонансной) области частот, контролируемой перестройкой резонансных частот. Отдельный раздел посвящен экспериментальным методам исследования: современным криостатам замкнутого цикла, использованным в диссертационной работе, СВЧ-оборудованию и приборам, необходимым для исследований. Подробно описан примененный в диссертационной работе уникальный лазерный сканирующий микроскоп (ЛСМ), который дал



возможность осуществить лазерное зондирование локальных сверхпроводящих и микроволновых характеристик исследуемых структур при низких температурах. Обсуждаются различные режимы работы лазерного микроскопа, позволяющие наряду с исследованием локальных температурно-зависимых параметров структур (сопротивление, критический ток, энергетическая щель), исследовать микродефекты, неоднородности структуры и состава, а также локальные изменения распространения микроволновых сигналов. В последнем разделе Главы 1 рассмотрены теоретические методы описания исследуемых спиральных резонаторов, обсуждается необходимость использования различных приближений, которая определяется тем, что строгий расчет характеристик таких структур связан с большими математическими трудностями.

Глава 2 диссертации связана с проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями кольцевого спирального резонатора, представляющего собой плоскую спираль Архимеда без центральной части (в виде узкого кольца). Одной из задач исследования было объяснение наблюдаемой необычной (нечетной) зависимости резонансных частот кольцевого спирального резонатора от числа  $n$  осцилляций тока. Такая зависимость характерна для четверть-волновых структур, в которых на одном конце имеет место узел, а на другом пучность тока. Однако проведенные измерения с помощью лазерного сканирующего микроскопа показали, что на обоих краях исследованных спиралей наблюдаются минимумы тока. Для теоретического анализа была развита подробная аналитическая модель, представляющая собой обобщение известного метода «спирально-проводящей цилиндрической поверхности» на случай плоского кольцевого спирального резонатора. В случае, когда ширина кольца резонатора много меньше его диаметра, такое обобщение вполне естественно. На основании полученных аналитических выражений были рассчитаны распределение тока и резонансные частоты для использованного в эксперименте ниобиевого спирального (тонкопленочного) резонатора с шириной витков 10 мкм и радиусом  $\sim 3$  мм. Значения экспериментальных и численных значений резонансных частот неплохо совпали. Анализ полученных данных показал, что наблюдаемое и в теории, и в эксперименте отношение резонансных частот, близкое к отношению нечетных чисел, связано не с четверть-волновым резонансом, а со сложной структурой волн резонансных мод. Следующим шагом, важным для использования кольцевых спиральных резонаторов в качестве элементов сверхпроводящих метаматериалов, был выполненный в диссертационной работе расчет структуры магнитного поля резонансных мод. Подробные расчетные графики распределения силовых линий магнитного поля первых пяти резонансных мод, представленные в диссертации, наглядно демонстрируют особенности магнитного взаимодействия резонатора с окружением в каждом из резонансов. Последний раздел Главы 2 посвящен экспериментальным измерениям резонансных частот (векторным анализатором цепей) и распределению токов в резонансных модах (лазерным сканирующим микроскопом), а также сравнению теоретических и экспериментальных данных. В диссертации представлены наглядные картины распределения токов нескольких резонансных мод в кольцевом резонаторе, полученные с помощью ЛСМ, которые вполне удовлетворительно соответствуют рассчитанным характеристикам.

Еще более сложная аналитическая задача решалась диссертантом при исследовании резонаторов в виде плоских спиралей Архимеда с центральной частью (Глава 3). Эту задачу нельзя свести к «спирально-проводящему цилиндру» или другой известной из литературы модели. Полученные аналитические выражения представляют собой сложные интегро-дифференциальные уравнения, аналитическое решение которых было возможным только с учетом некоторых приближений. Как и в случае кольцевого резонатора, были рассчитаны резонансные частоты и распределение



магнитного поля резонансных мод. Для экспериментальных исследований распределения магнитного поля спирального резонатора использовалась оригинальная установка, использующая сканирование петли специального ВЧ-пробника с диаметром 0.5 мм вблизи поверхности медного резонатора с шириной витков 0.35 мм. Для измерения распределения токов с помощью ЛСМ с помощью тонкопленочных технологий и оптической литографии были изготовлены ниобиевые спиральные резонаторы с шагом 20 мкм и диаметром 3 мм. Получено хорошее соответствие при сравнении экспериментальных результатов и аналитических расчетов, а также при сравнении эксперимента с численными расчетами на основе пакета HFSS для трехмерного электромагнитного моделирования.

Глава 4 диссертации посвящена аналитическому моделированию электромагнитного отклика метаматериала, представляющего собой 3-х-мерную кубическую решетку спиральных резонаторов. В первом разделе рассчитана энергия электромагнитного взаимодействия двух спиральных резонаторов, ее зависимость от расстояния между резонаторами и шага спирали. Второй раздел главы связан с расчетом такой важной для «магнитного метаматериала» характеристики как магнитная проницаемость. В заключительном разделе произведен учет радиационных потерь метаматериала для получения реалистичных зависимостей магнитной проницаемости в области резонансов. Численные расчеты для метаматериалов на основе ниобиевых спиральных резонаторов, исследованных в Главе 3, показывают, что вблизи резонансной частоты первой моды существует заметная область (10-15 % от резонансной частоты) с отрицательной магнитной проницаемостью, необходимой для реализации метаматериала с отрицательным показателем преломления.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации, которые свидетельствуют о том, что в работе теоретически и экспериментально исследованы новые магнитные метаматериалы на основе плоских спиральных резонаторов, развиты новые теоретические модели, проведено сравнение с экспериментальными данными. Успешное выполнение задач диссертационной работы основано как на хорошем владении диссертантом теоретическими методами, так и на использовании современных достижений технологии тонкопленочных структур.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. В развитых моделях, фактически, не учтены экранирующие свойства сверхпроводящих витков. Поэтому, не вполне ясно, все ли магнитное поле, рассчитанное в этих моделях для идеального, но несверхпроводящего материала, в реальном сверхпроводящем случае может проходить сквозь намотку спирального резонатора, как это показано, например, для кольцевого резонатора на рисунках 14-21? Нет ли в реальном (экспериментальном) случае ниобиевой спирали некоторого дополнительного выталкивания магнитного поля кольцом сверхпроводящего резонатора как целым (и соответствующего перераспределения тока).
2. В тексте диссертации, фактически не обсуждаются результаты численных расчетов, выполненные с помощью пакета HFSS для трехмерного электромагнитного моделирования. Вместе с тем, результаты этого моделирования, представленные на рисунках 34 и 38, наиболее близки к экспериментальным кривым.
3. Некоторая путаница присутствует в тексте диссертации при обсуждении уравнений (122) и (127) для величины  $\mu$ . Эта величина называется то намагниченностью метаматериала, то магнитной проницаемостью метаматериала, хотя по смыслу и размерности это магнитная проницаемость в расчете на один мета-атом.
4. Присутствуют стилистические недочеты в структуре диссертации и фактические опiski в ее тексте.



- Так литературный обзор и описание экспериментальных и теоретических методов размещены в одной главе. Для лучшего отдельного восприятия литературных данных и оригинальной работы диссертанта лучше было бы их разделить, тем более, что имеются повторы при описании методик в оригинальных главах.
- Отсутствуют выводы по результатам глав. Поэтому главы производят впечатление не вполне законченных.
- Скрипты (программы вычислений) можно было бы вынести в приложение, чтобы не разрывать связность изложения в тексте.
- Полученные распределения тока в резонансных модах (рисунки 8-12) можно было бы объединить на одном графике, как это сделано в автореферате (рис. 3).
- Двойные рисунки не пронумерованы (например, «а» и «б»). Так на рис. 25 представлено распределение тока для трех мод на левом рисунке, а для четвертой – справа, без всяких пояснений в подписи под рисунком и в тексте. В автореферате в подписи под рис. 5 дана ссылка на ур.(90) в соответствии с нумерацией в тексте диссертации, а не на ур.(5) в соответствии с нумерацией в тексте автореферата.

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 на их основе. 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, содержание диссертационной работы "Электродинамика сверхпроводящих метаматериалов на основе плоских спиральных резонаторов" соответствует критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор – Малеева Наталия Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- Физика конденсированного состояния"

Отзыв составил

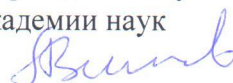
Ведущий научный сотрудник

Лаборатории сверхпроводимости

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института физики твердого тела Российской академии наук

(ИФТТ РАН), д. ф.-м. н., проф.



Л.Я. Винников

Доклад по диссертационной работе заслушан на Семинаре по сверхпроводимости ИФТТ РАН, диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета ИФТТ РАН (протокол № 20 от 16 ноября 2015 года).