

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу *Малеевой Наталии Андреевны* "Электродинамика сверхпроводящих метаматериалов на основе плоских спиральных резонаторов", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Малеевой Наталии Андреевны выполнена на кафедре теоретической физики и квантовых технологий Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». Работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию электродинамических свойств метаматериалов, построенных из компактных сверхпроводниковых резонаторов.

Тематика работы актуальна как для фундаментальных исследований, так и для приложений. Метаматериалы – искусственные среды с необычными электродинамическими свойствами – одно из горячих направлений исследований на стыке радиофизики, оптики и физики конденсированного состояния, развитие которого началось уже в XXI веке. Идея создавать среды с заданными свойствами, конструируя их из отдельных элементов с размерами много меньше длины волны, оказалась необычайно плодотворной и уже привела к созданию новых практических решений в радиоэлектронике, в частности в антенной технике.

Первые продемонстрированные метаматериалы состояли из «мета-атомов» сантиметрового размера и работали в радиочастотном диапазоне. В настоящее время, предпринимаются интенсивные усилия по продвижению их в более коротковолновые области спектра, вплоть до оптического диапазона, что требует радикальной миниатюризации мета-атомов. При этом остро встает проблема омических потерь, приводящих к уменьшению добротности резонансов и исчезновению нетривиальных оптических свойств. Поэтому исследование возможности построения метаматериалов из сверхпроводниковых мета-атомов, диссипация в которых может быть исчезающе малой, весьма актуально и практически значимо.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, его научная новизна и практическая значимость, перечислены основные результаты и положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

Первая глава диссертации является вводной, она содержит обзор литературы и описание методов исследования. В ней определяются термины «мета-атом» и «метаматериал», приводится краткая историческая справка, описываются основные современные подходы к построению метаматериалов с различными требуемыми свойствами и для различных частотных диапазонов и достигнутые результаты. Обосновывается актуальность разработки метаматериалов на основе сверхпроводниковых мета-атомов. Приводятся сведения об основных типах сверхпроводниковых мета-атомов, сопровождаемые некоторыми базовыми сведениями об электродинамических свойствах сверхпроводников. Далее описаны основные экспериментальные методы исследования электродинамики сверхпроводниковых мета-атомов – измерение коэффициента передачи системы, содержащей мета-атом, с помощью векторного анализатора цепей, и лазерная сканирующая микроскопия, а также методы получения криогенных температур. Излагаются расчетные методы, известные для спиральных замедляющих систем.

Вторая глава посвящена исследованию сверхпроводникового мета-атома – резонатора в виде кольцевой спирали Архимеда, т.е. спирали, внутренний и внешний радиус которой достаточно

близки друг к другу. Автор развивает аналитический метод расчета электродинамики такой спирали, основываясь на известном приближении анизотропно-проводящей поверхности. Ей получено интегральное уравнение Карлеманового типа для распределения тока вдоль спирали и найдено его приближенное аналитическое решение. Это позволило, в частности, рассчитать набор частот собственных колебаний резонатора, отношение которых оказалось близко к последовательным нечетным числам. Полученное решение использовано для расчета магнитного поля резонатора. Далее в главе описывается эксперимент по измерению спектра частот спирального резонатора, который заключается в измерении зависимости коэффициента прохождения от частоты для системы из возбуждающего и детектирующего витков, между которыми размещен исследуемый резонатор миллиметрового в плане размера. Эксперимент также дает спектр частот, кратных последовательным нечетным числам, количественно хорошо совпадающий с результатом расчета. Наконец, описывается эксперимент по лазерной микроскопии, позволивший исследовать распределение сверхтока по структуре с пространственным разрешением не менее нескольких мкм. В результате установлено, что, действительно, ряд собственных частот резонатора соответствует последовательным модам колебаний и отсутствие частот, кратных четным числам, обусловлено не слабой связью четных мод с окружением, а с нетривиальным законом распределения тока по длине спирали вблизи ее краев.

В третьей главе диссертации аналогичные задачи поставлены и решены для сверхпроводникового мета-атома в виде полной спирали Архимеда. Тот же приближенный метод, что и примененный для расчета электродинамики кольцевой спирали, в случае полной спирали приводит к значительно более сложному дифференциальному уравнению для функции тока от координаты. Несмотря на это, автору удалось и в данном случае найти приближенное аналитическое решение, которое, как показало сравнение с численными расчетами и с экспериментами диссертанта, описанными далее в той же главе, имеет вполне достаточную для практических целей точность. В отличие от случая кольцевой спирали, спектр частот оказался характерным для полуволнового резонатора – резонансные частоты кратны последовательным целым числам. Это связано с практически синусоидальным законом распределения тока по длине спирали. Эксперименты снова представляли собой измерение спектра пропускания через резонатор и лазерную микроскопию распределения тока. Кроме того, было предпринято измерение распределения магнитного поля резонатора для модельного объекта – медной спирали с внешним диаметром 32 мм, содержащей 23 витка. Измеренная зависимость магнитного поля вблизи плоскости спирали от расстояния до ее центра хорошо аппроксимируется аналитической кривой для всех исследованных резонансов, что говорит о хорошей применимости модели даже в случае относительно небольшого числа витков.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию электродинамики собственно метаматериала – среды, составленной из мета-атомов, которыми в данном случае являются сверхпроводниковые спиральные резонаторы. В качестве предварительного шага, рассмотрено магнитное взаимодействие пары резонаторов, возбужденных на своей основной частоте, и рассчитана величина энергии взаимодействия и ее зависимость от расстояния. Это вычисление имеет целью установить масштаб расстояний, на котором взаимодействие между резонаторами может считаться пренебрежимо малым. Далее рассмотрена простейшая модель метаматериала – кубическая решетка, в узлах которой расположены компактные спиральные резонаторы. Рассчитана магнитная проницаемость такой среды как функция частоты и продемонстрировано, что вблизи резонанса имеется область отрицательных значений магнитной проницаемости, ширина которой составляет около 15% от частоты резонанса. Также оценено влияние излучательного затухания резонаторов на электродинамические свойства метаматериала и показано, что при реалистических значениях коэффициента затухания сохраняется область отрицательной магнитной проницаемости.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В качестве замечаний можно указать следующее.


1. При построении теоретической модели спирального сверхпроводникового резонатора используется ряд приближений, в том числе, предполагается малость кинетической индуктивности резонатора по сравнению с геометрической индуктивностью и отсутствие омических потерь. К сожалению, не обсуждаются (качественно и количественно) степень обоснованности и границы применимости этих приближений. В то же время, очевидно, что при уменьшении размеров резонатора и, соответственно, толщины и ширины сверхпроводящей полоски, формирующей спираль, кинетическая индуктивность должна в некоторый момент стать доминирующим вкладом в погонную индуктивность полоски. С другой стороны, при увеличении частоты, на которой работает метаматериал, до величины, сопоставимой с энергетической щелью сверхпроводника (или при соответствующем увеличении температуры), должны стать существенными эффекты диссипации из-за тока квазичастиц. Наличие оценок вклада от этих эффектов и количественное указание границ применимости модели поставило бы работу в более широкий физический контекст, сделало ее более обоснованной и полезной для практики.
2. При расчете влияния излучательного затухания на электродинамические свойства метаматериала не учтена интерференция между вторичными волнами, испускаемыми отдельными резонаторами. Это соответствует ситуации, когда размер образца метаматериала мал по сравнению с длиной волны, однако в такой ситуации затруднительно говорить о метаматериале как о среде с нетривиальными «оптическими» свойствами – последние не имеют возможности проявиться.
3. Как отмечает автор, нечетный спектр собственных колебаний полуволнового резонатора в виде спирали без центральной части может быть объяснен в терминах эффективного уменьшения длины спирали (связанного с изменением фазовой скорости вблизи концов спирали), приблизительно на четверть длины волны. Точность, с которой это правило работает, весьма велика и растет с увеличением номера резонанса. Представляется, что здесь может существовать простое качественное объяснение, однако в диссертации его нет. Данное замечание, как, впрочем, и предыдущее, является, конечно, скорее пожеланием по дальнейшему развитию работы.
4. При расчете излучательного затухания резонаторов, учитывается вклад в энергию, связанный с кинетической индуктивностью сверхпроводника, в то время как во всех остальных расчетах автор ей пренебрегает. Это, на мой взгляд, непоследовательно, хотя и не оказывает существенного влияния на результат – вклад кинетической индуктивности оказывается малым.
5. Имеются также замечания по представлению работы. Некоторые разделы написаны довольно схематично, что заставляет читателя домысливать отдельные детали. Например, в 3 параграфе второй главы графики зависимостей рассчитанного магнитного поля кольцевого спирального резонатора представлены для резонатора существенно больших размеров, чем обсуждавшийся во 2 параграфе той же главы. Эта разница никак не комментируется. Кроме того, в тексте есть некоторое количество опечаток. Например, на стр. 13 сообщается, что «разрезные кольца для работы на частоте 10 ГГц изготавливаются из очень толстого металлического слоя (25–50 мм)», при этом «типичный внешний диаметр кольца порядка 2,5 мм» – вероятно, в действительности толщина слоя составляет 25–50 мкм.

Сделанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы. Резюмируя могу сказать, что автором решена новая, актуальная и практически значимая задача - развито теоретическое описание и осуществлено экспериментальное исследование электродинамики компактных спиральных резонаторов. Полученные диссертантом результаты, несомненно, вносят значительный вклад в развитие исследований и разработок сверхпроводниковых метаматериалов. Отмечу также следующее интересное обстоятельство. Несмотря на то, что спиральные резонаторы как таковые

известны уже более века, до сих пор не было предложено аналитической модели, количественно правильно описывающей их свойства и, в частности, спектр резонансных частот. Поэтому можно утверждать, что работа вносит вклад также в классическую область радиофизики и заполняет одну из старых лакун в ней. Это, на мой взгляд, само по себе свидетельствует о высоком уровне работы.

Таким образом, можно констатировать, что диссертация Н.А. Малеевой представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Выводы и рекомендации диссертанта достаточно обоснованы. Достоверность результатов обусловлена применением адекватных теоретических и экспериментальных методов и подтверждается согласием между теорией и экспериментом. Результаты работы опубликованы в ведущих научных журналах и представлены докладами на международных и всероссийских конференциях (всего шесть публикаций, из них пять – в изданиях, индексируемых Web of Science). Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Н.А. Малеева, безусловно, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрой общей
и экспериментальной физики МПГУ



/Гольцман Г.Н./

20.11.2015

Гольцман Григорий Наумович,

Заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» (МПГУ).

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. М. Пироговская, д. 1, стр.1.

Тел. +7 499 2466321

e-mail goltsman@msspu-phys.ru

