

ОТЗЫВ

официального оппонента на работу Малеевой Наталии Андреевны «Электродинамика сверхпроводящих метаматериалов на основе плоских спиральных резонаторов», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Н.А. Малеевой посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию в новой и динамично развивающейся области физики - электродинамике сверхпроводящих метаматериалов. С пионерской работы В.Г. Веселаго прошло достаточно много времени, чтобы возможность конструирования искусственных сред с отрицательным показателем преломления была осознана и реализована. Одно из главных преимуществ метаматериалов – это возможность создавать СВЧ устройства нового поколения с изменяемыми свойствами, а также позволяет делать элементы (например, антенны и линзы) более компактными и эффективными. Однако, попытка миниатюризации элементов искусственных сред, т.н. мета-атомов, вскоре наткнулась на ограничение, связанное с возрастанием потерь в метаматериале. В этой связи исследование сверхпроводящих метаматериалов, имеющих существенно меньшие поверхностные потери, чем аналогичные структуры из нормальных металлов, является важным и востребованным. Кроме того, нацеленность автора на дальнейшее уменьшение размеров мета-атомов естественным образом привело к изучению свойств спиральных резонаторов, что сопряжено с рядом математических трудностей и подчеркивает несомненную актуальность проведенных исследований.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора и списка цитированной литературы состоящего из 78 ссылок. Она изложена на 103 страницах, включая 42 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводится формулировка цели работы, описывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту, а также приводятся сведения об апробации результатов и публикациях по теме диссертации.

В первой главе проводится аналитический обзор литературы. Даются классификации магнитных материалов, метаматериалов и сверхпроводящих СВЧ метаматериалов. Дано описание экспериментальных методов исследования сверхпроводящих метаматериалов и теоретические методы исследования спиральных резонаторов.

Во второй главе проведено теоретическое и экспериментальное исследование плоского кольцевого сверхпроводящего резонатора в форме спирали Архимеда без центральной части. В ходе исследования автором было показано, что резонансные частоты относятся как нечетные

числа. Было проведено наблюдение распределения тока в спирали на резонансных частотах с помощью лазерного сканирующего микроскопа. При этом показано, что распределение тока в резонаторе характерно для полуволнового резонатора: на краях спирали ток минимален, а на каждом резонансе число максимумов тока совпадает с номером моды. Была построена теоретическая модель кольцевого резонатора, которая не смотря на достаточно простые аналитические формулы достаточно хорошо описывает результаты измерений. В последующих разделах данной главы были проведены аналитические и экспериментальные исследования магнитного поля в резонаторе.

В третьей главе проведено теоретическое и экспериментальное исследование плоского сверхпроводящего резонатора в форме спирали Архимеда. Такой резонатор является еще более компактным, чем кольцевой резонатор, изученный в предыдущей главе, однако его теоретическое описание является более сложным, из-за того, что теперь область заполнения резонатора не является малой по сравнению с его радиусом. Тем не менее, автором была успешно построена теоретическая модель такого резонатора, и полученные результаты удалось представить в компактной аналитической форме. Было проведено сравнение теоретических результатов с результатами расчета в пакете электродинамического моделирования HFSS, а также с результатами измерений данного резонатора как для амплитуды плотности тока вдоль радиуса спирали, так и для магнитного поля вблизи поверхности спирали. Показано, что все результаты достаточно хорошо согласуются друг с другом. В этой же главе дано описание установки, с помощью которой были проведены измерения собственных мод спирального резонатора и пространственное распределение радиальной компоненты магнитного поля вблизи витков спирали.

В четвертой главе полученные в предыдущих главах результаты позволили провести обобщающее исследование как подобные мета-атомы взаимодействуют между собой. В первом разделе получено компактное аналитическое выражение для энергии взаимодействия двух спиралей, из которого следует, что энергия взаимодействия увеличивается при увеличении плотности навивки, а также спадает как куб расстояния между центрами спиралей. В следующих разделах главы проведено теоретическое исследование электромагнитного отклика метаматериала в виде кубической решетки, в узлах которой вместо атомов находятся спиральные мета-атомы, на внешнее магнитное поле, а также учтено влияние радиационных потерь мета-атома на магнитную восприимчивость метаматериала. Показано, что на первой моде коэффициент потерь такой спирали составляет порядка 0.1-0.01 и при этом сохраняется частотная область, где магнитная восприимчивость отрицательна, ширина этой области составляет порядка 10%-15% от резонансной частоты.

В заключении суммируются основные результаты и выводы диссертационной работы.

В целом работа оставляет хорошее впечатление. Она грамотно написана и хорошо иллюстрирована, автор умело сочетает достаточно сложные и детальные экспериментальные исследования с аналитическими расчетами для решения поставленных задач и дает трактовку полученным результатам. Достоверность результатов не вызывает сомнений.

Полученные результаты могут иметь не только фундаментально-научное, но и прикладное значение. Эти результаты могут быть использованы в МГУ, ИТМО, СПбГУ, ННГУ, ИФМ РАН, ИПФ РАН, ИРЭ РАН и в других организациях, занимающихся исследованием метаматериалов, и при чтении специальных курсов лекций для студентов соответствующих специальностей.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

К числу недостатков диссертационной работы можно отнести следующее:

- В работе многократно говорится о вкладе соавторов в создание экспериментальной установки в МИСиС и проведение численного моделирования в пакете HFSS, однако не акцентируется то, что часть измерений была проведена в МИСиС, а измерения на лазерном сканирующем микроскопе, судя по представленным фото, проведены во время командировок в университет Карлсруэ, хотя было бы логично это также отразить в тексте.
- В работе присутствуют опечатки. В основном они связаны с не всегда корректным переводом англоязычных публикаций автора на русский язык. Например, на стр. 13 присутствует термин "радиационная эффективность", в то время как в русском языке слово "радиационная" обычно употребляется в контексте радиационной безопасности и стойкости, а не в контексте излучения. На стр. 17 - был предсказан и назван именем ... - надо было сначала написать, что предсказан на основе теории Бардина-Купера-Шриффера, а потом уже что назван именем Джозефсона. На стр. 21 - рф сквид - должно быть СВЧ СКВИД. На стр. 22 - дипстик - обычно в русском не употребляется. На стр. 25 - ЛСМ изображение - дано без предварительной расшифровки "лазерный сканирующий микроскоп". На стр. 44 - Карлеманового типа - должно быть типа Карлемана. На стр. 45 опечатка в номере формулы (67): (67) и (67). На стр. 47 в функциях программы Mathematica есть пустые квадраты, они возникли видимо из-за отсутствия нужных шрифтов. Кроме того, при параметрах, представленных при уравнении (65) вроде бы должно быть $\text{Log}[7.5]$, а не $\text{Log}[15.]$, возможно скрипты приведены в качестве примера для параметров другой спирали. На стр. 60 и далее в названии диод Шоттки пропущена буква "т". В подписи к Рис. 23 "микроволновая часть установки стоит" - должно быть состоит. В конце стр. 72 - "приведена на рисунках 3–8" - видимо, имеются в виду Рис. 34 и 38.

Данные недостатки не сказываются на общем положительном впечатлении от диссертационной работы. Результаты работы достаточно полно опубликованы и доложены на конференциях самого высокого уровня. Считаю, что диссертация «Электродинамика

сверхпроводящих метаматериалов на основе плоских спиральных резонаторов» соответствует требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Н.А. Малеева, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

Панкратов Андрей Леонидович

Почтовый адрес: ГСП-105, Нижний Новгород, 603950, Россия

Телефон: +79051913223

e-mail: alp@ipmras.ru

Институт физики микроструктур РАН

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела терагерцовой спектроскопии



Подпись Панкратова А.Л. заверяю

Ученый секретарь ИФМ РАН,

кандидат физ.-мат. наук



Д.А. Рыжов