

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиоэлектроники (КРЭ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор

 В. П. Якубов

« 17 » июня 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И
МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С БОЛЬШИМИ ПОТЕРЯМИ

по основной образовательной программе подготовки магистров
направление подготовки 03.04.03 - Радиофизика

Поливанова Анна Сергеевна

Научный руководитель ВКР:

канд. физ.-мат. наук, доцент

 О. А. Доценко

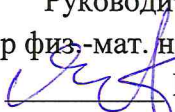
« 11 » июня 2019 г.

Автор работы:

студент группы № 731

 А. С. Поливанова

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра радиоэлектроники (КРЭ)

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
 В. П. Якубов
« 18 » сентября 2017 г.

ЗАДАНИЕ

по подготовке ВКР магистра
студенту Поливановой Анне Сергеевне группы № 731

1. Тема ВКР: Прямоугольный резонатор для исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитоэлектрических материалов с большими потерями.

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

- | | |
|---------------|-------------|
| а) на кафедре | 11.06.2019, |
| б) в ГЭК | 24.06.2019. |

3. Исходные данные к работе:

Цель работы – методами численного моделирования и экспериментального исследования оценить границы применимости метода малых возмущений при измерениях электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитоэлектрических материалов с большими потерями в прямоугольном резонаторе.

Решаемые задачи: обзор источников научно-технической литературы по теме диссертации, освоение методик исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитоэлектрических материалов; вывод аналитических выражений для диэлектрических и магнитоэлектрических образцов в резонаторе, проведение численного эксперимента; изготовление и экспериментальное исследование комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе диэлектрических включений; анализ результатов численного и натурального экспериментов; обобщение результатов НИР, составление и редактирование текста диссертации.

Объекты исследования – электромагнитные характеристики диэлектрических и магнитоэлектрических материалов с большими потерями.

Достоверность результатов оценивается на основе проведения модельных экспериментов для частных случаев с известными характеристиками материалов. Список опубликованных работ по теме диссертации и их апробация подтверждают достоверность и ее новизну.

4. Краткое содержание работы

Работа содержит:

- обзор существующих методов исследования электромагнитных характеристик материалов (Раздел 1);
- резонаторный метод и формулы для расчета электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов, выведенные с учетом размера образца и его местоположения в полости резонатора (Раздел 2);
- экспериментальные и численные исследования (Раздел 3);
- заключение и список использованных источников;
- отчет о проведении патентных исследований (Приложение А).

Срок выполнения работы: 20.09.2017 – 01.06.2019.

Ожидаемые результаты:

- освоение существующих методик исследования электромагнитных характеристик;
- получение расчетных формул для исследования диэлектрических и магнитодиэлектрических образцов;
- численное моделирование электродинамической системы (прямоугольный резонатор с образцом) с реальными характеристиками и реальными геометрическими размерами образцов;
- проведение натурных испытаний при смещении образца из пучности электрического поля;
- сравнение и анализ полученных результатов.

5. Дата выдачи задания « 18 » сентября 2017 г.

Руководитель ВКР –
канд. физ.-мат.
наук, доцент НИ ТГУ



О. А. Доценко

Задание принял к исполнению



А. С. Поливанова

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация содержит 65 страниц, 3 главы, 10 таблиц, 20 рисунков, 19 формул, 43 источника, 2 приложения.

ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, МАГНИТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Объекты исследования – электромагнитные характеристики диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями.

Цель работы – методами численного моделирования и экспериментального исследования оценить границы применимости метода малых возмущений при измерениях электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями в прямоугольном резонаторе.

В результате работы:

а) проведен обзор источников научно-технической литературы по теме диссертации, освоены методики исследования электромагнитных характеристик материалов;

б) выведены аналитические выражения для диэлектрических и магнитодиэлектрических образцов в резонаторе, проведено численный эксперимент;

в) изготовлены и проведены экспериментальные исследования комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе диэлектрических включений;

г) проанализированы результаты численного и натурного экспериментов;

д) обобщены результаты НИР, составлен и отредактирован текст диссертации;

е) работа представлена на конференциях: «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск), «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск), МНСК-2017 (г. Новосибирск), «Функциональные материалы: разработка, исследование, применение» (г. Томск) и СНИИ-2017 (г. Томск).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Методы исследований электромагнитных характеристик материалов.....	7
1.1 Исследования характеристик материалов с малыми потерями.....	10
1.2 Исследования характеристик материалов с большими потерями.....	20
1.3 Методы расчета комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости.....	22
2 Прямоугольный объёмный резонатор.....	26
2.1 Структура электромагнитного поля.....	26
2.2 Основной тип колебаний.....	28
2.3 Вывод формул для расчета диэлектрической и магнитной проницаемости с учётом размера и местоположения образца.....	31
2.4 Вывод формул для расчёта погрешности в $\Delta\dot{\omega}/\omega_0$ за счёт неточной установки образца в рамках теории малых возмущений.....	36
3 Экспериментальные и численные исследования.....	39
3.1 Численное моделирование прямоугольного резонатора с образцом.....	39
3.1.1 Диэлектрический образец.....	39
3.1.2 Магнитодиэлектрический образец.....	41
3.2 Оценка относительной погрешности измерения комплексной диэлектрической проницаемости.....	43
3.3 Экспериментальные исследования электрофизических характеристик материалов с большими потерями.....	46
Заключение.....	49
Список использованных источников.....	51
Приложение А Отчет о патентных исследованиях.....	56
Приложение Б Справка об использовании в учебном процессе.....	65

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при разработке новой радиоаппаратуры возникает необходимость в проведении исследований современными методами электромагнитных характеристик, а также коэффициентов отражения, прохождения и поглощения природных и искусственных материалов в широком частотном диапазоне. Для этих целей используются разные типы измерительных ячеек: коаксиальные и микрополосковые резонаторы, рупора, открытые резонаторы, измерительные конденсаторы, объёмные цилиндрические и прямоугольные резонаторы и т. д. [1, 2]. Каждая из этих ячеек работает в определенном частотном диапазоне.

Метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости на СВЧ в коаксиальной ячейке [2] используется для исследований небольшого количества исследуемого образца, в связи с малыми размерами ячеек. Преимущества данного метода заключаются в том, что данный метод применим для материалов, поддающихся механической обработке, и является широкополосным [3 – 5]. Прямоугольный объёмный резонатор используется для измерения параметров материалов в дискретном наборе точек, соответствующих его резонансным частотам [6]. Диапазон измерений зависит от размеров резонатора. Преимуществом объёмного резонатора является возможность измерений малого количества образца исследуемого материала, а также измерение материалов с небольшими величинами электромагнитных параметров. Для определения характеристик исследуемых образцов материалов используется метод малых возмущений (ММВ). Но в случае измерения параметров материалов с большими потерями большинство авторов данный метод не используют в связи с его ограничениями на размер и материальные параметры. Поэтому необходимо оценить возможность применимости резонаторного метода в этом случае.

Цель магистерской диссертации – методами численного моделирования и экспериментального исследования оценить границы применимости ММВ при измерениях электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями в прямоугольном резонаторе.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

а) обзор источников научно-технической литературы по теме диссертации, освоение методик исследования электромагнитных характеристик материалов;

б) вывод аналитических выражений для диэлектрических и магнитодиэлектрических образцов в резонаторе, проведение численного эксперимента;

в) изготовление и экспериментальные исследования комплексной диэлектрической проницаемости композитов на основе диэлектрических включений;

г) анализ результатов численного и натурального экспериментов;

д) обобщение результатов НИР, составление и редактирование текста диссертации.

Объект исследования: электромагнитные характеристики диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями.

Методы исследования: резонаторный метод измерения электромагнитных характеристик.

Предмет исследования: объемный прямоугольный резонатор.

Положения, выносимые на защиту (ПВЗ) диссертантом:

1) При исследовании неполярных диэлектриков при допустимом смещении образца, относительный объем которого не превышает $4,3 \times 10^{-3} \%$, в полости резонатора вдоль широкой стенки не более 2 мм относительная погрешность действительной части диэлектрической проницаемости составляет около 5 %, мнимой – около 8 %. При смещении образца вдоль резонатора не более 5 мм относительная погрешность действительной части диэлектрической проницаемости составляет около 6 %, мнимой – около 10 %.

2) При исследовании магнитодиэлектрических материалов с большими потерями при допустимом смещении образца, относительный объем которого не превышает $4,3 \times 10^{-3} \%$, в полости резонатора вдоль узкой стенки не более 3 мм относительная погрешность действительной части магнитной проницаемости составляет около 16 %, мнимой – около 17 %. При смещении образца вдоль резонатора не более 5 мм относительная погрешность действительной части магнитной проницаемости составляет около 15 %, мнимой – около 18 %.

3) Для улучшения адгезионных свойств радиопоглощающего покрытия на основе вододисперсионной краски и МУНТ необходимо при его изготовлении исходную смесь наносить слоями, при этом в многослойном композиционном материале с увеличением числа слоев увеличивается объемная фракция наполнителя, и при измерении образца в полость резонатора попадает большее количество проводящих включений, что обнаруживается в увеличении значений как действительной, так и мнимой части ДП.

Обоснование достоверности ПВЗ:

Достоверность защищаемых положений подтверждается сравнением полученных результатов с результатами моделирования Л. Д. Ложкина «Моделирование электрофизических параметров тонких образцов на основе объёмных резонаторов среде проектирования Microwave Studio» [7], 2016 г., в которых утверждается, что относительная погрешность расчета комплексной диэлектрической проницаемости не превышает 15 %, и результатами, сформулированными в работе Borah K., Bhattacharyya N. S. «Magnetodielectric composite with ferrite inclusions as substrates for microstrip patch antennas at microwave frequencies», 2012 г., в которой говорится, что в многослойном композиционном материале с увеличением числа слоев увеличивается объемная фракция наполнителя, тем самым это приводит к увеличению диэлектрической проницаемости.

Обоснование новизны ПВЗ:

Установлена количественная зависимость между смещением образца в полости резонатора относительно центра и погрешностью получаемых результатов.

Обоснование практической значимости ПВЗ:

Практическая значимость положений состоит в том, что учет местоположения образца в расчетных формулах теории возмущений позволяет повысить точность результатов экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости.

1 Методы измерений электромагнитных характеристик материалов

Широкое распространение материалов, поглощающих сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение и используемых в радиоэлектронной технике, приборостроении и других отраслях промышленности, определяет необходимость более глубокого исследования этих материалов, как с позиции эффективного применения, так и с позиции исследования их свойств. Практическое использование существующих, а также разработка новых материалов требует точного контроля электродинамических параметров, ответственных за качество поглощения электромагнитной волны. Как известно, основными электродинамическими параметрами любого вещества, характеризующими взаимодействие электромагнитной волны с материалами, являются диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости (ДП и МП, соответственно) [8].

Существуют различные методы по способу измерения параметров материалов: квазиоптические методы или методы свободного пространства [9], волноводные методы [2, 10], резонансные методы [11]. Квазиоптические методы применяются для измерения параметров материалов преимущественно в диапазонах частот от 3 до 300 ГГц. Сущность методов основана на измерении скорости распространения электромагнитной волны и её затухания в исследуемом материале. Волноводные методы широко применяются для измерений в СВЧ диапазоне и, при использовании коаксиальных линий, могут применяться в диапазоне 300 – 3000 МГц. Сущность волноводных методов заключается в том, что отрезок прямоугольного или коаксиального волновода [12] заполняется исследуемым веществом, после чего измеряется скорость и затухание волны, проходящей указанный отрезок. Затем на основе измеренных данных рассчитывается диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь исследуемого образца. Резонансные методы основаны на измерении свойств колебательных систем при введении в них образцов исследуемых веществ. Эти методы применяются в широком диапазоне частот – от единиц МГц до десятков ГГц. Резонансный метод удобен для измерения параметров сыпучих тел и жидкостей. Но когда диэлектрическая проницаемость материала значительно превышает единицу, то при помещении исследуемого образца в резонатор

резонансная частота и добротность сильно изменяются, что приводит к большим погрешностям при вычислении $\text{tg}\delta$. Помимо этого, определенные сложности представляют заполнение без зазора твердым материалом всей полости резонатора. Поэтому при измерении параметров твердых образцов применяют метод, когда заполняется только часть объема резонатора с размещением в нем образца вещества, плотно прилегающего к стенкам. Расчёты в этом случае значительно усложняются, поскольку требуется решение трансцендентных уравнений относительно ϵ и $\text{tg}\delta$ с помощью специальных таблиц и графиков [8, 13].

У каждого из методов есть свои достоинства и недостатки: подготовка образцов необходимых форм и размеров [6], требования к исходным характеристикам образцов при проведении измерений [14] и др.

В области частот выше ста мегагерц и выше квазистационарные измерительные системы на основе конденсаторов и индуктивностей теряют добротность и не могут быть использованы в качестве измерительных ячеек. Повышение добротности достигается применением электромагнитных колебательных систем, представляющих собой полностью или частично замкнутые объёмы с проводящими стенками, в которых реализуется режим стоячих волн. Эти системы называются объёмными резонаторами.

Измерение электромагнитных характеристик образцов исследуемых материалов с помощью прямоугольного резонатора относится к резонансным методам. Такие методы, включая, в том числе резонансные методы возмущений, могут обеспечить более высокую точность измерений по сравнению с нерезонансными при низких потерях в материале [15].

В ходе проведения патентного поиска (Приложение А) по ключевым фразам «резонаторный метод» и «методы исследования электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне» были проанализированы рефераты и описания изобретений из баз данных патентных ведомств России и США. В результате анализа были отобраны 8 патентов, подходящих под тему магистерской диссертации.

Проведенный анализ патентной литературы показал, что в известных источниках практически не исследованы следующие вопросы:

- не исследованы электромагнитные характеристики материалов с большими потерями резонаторным методом;
- не исследовано влияния положения образца исследуемых материалов в полости резонатора;
- не исследовано распределение электромагнитного поля при помещении образца исследуемого материала с большими потерями.

При проведении патентного поиска было выявлено изобретение «Устройство для измерения комплексной диэлектрической проницаемости тонкопленочных материалов на сверхвысоких частотах» [16], наиболее близкое по технической сущности к проблеме диссертационного исследования. Для измерения параметров тонкопленочных материалов авторы используют прямоугольный объемный резонатор, в середине которого выполнен узкий паз перпендикулярно оси волновода. Анализ влияния материальных параметров образца на резонансные частоты и добротности резонатора проводится с использованием метода малых возмущений.

Из источников научно-технической информации выявлено несколько публикаций, имеющих непосредственное отношение к теме поиска. Авторы статьи [17] показали, что известные формулы для расчёта электромагнитных характеристик образцов материалов, полученные в приближении метода малых возмущений, дают погрешность в результатах измерения. Они пишут, что в этом методе считается, что внесение образца не изменяет структуру поля в резонаторе. Однако при внесении образца поле изменяется, и получаемые результаты всегда содержат ошибку. В данной работе представлены измерения известного материала (лавсана, полиэтилентерефталата) и приведены поправочные коэффициенты, полученные на основании измерений данного материала. Также авторы отмечают, что на погрешность получаемых результатов оказывает влияние положение образца в резонаторе, о чем сказано в работах [17 – 19].

В работе [7] проведено моделирование в среде проектирования Microwave Studio в диапазоне частот от 7 до 13 ГГц электрофизических параметров тонких образцов, помещенных внутрь объемного прямоугольного резонатора. При этом использовался метод возмущений. В результате показано, что расхождение между

экспериментальными и промоделированными результатами не превышает 15 % и ММВ удобен для оценки диэлектрической проницаемости тонких образцов.

1.1 Исследования материалов с малыми потерями

Для изучения эффектов, появляющихся при возмущении электродинамической системы и проявляющихся в изменении резонансной частоты и других параметров прямоугольного резонатора, таких как условия резонанса, резонансная длина волны и резонансная частота, анализируются в работе [20] с помощью метода возмущений для объемного резонатора, работающего в режиме отражения электромагнитной волны (т. е. короткозамкнутого). Соотношение (1), полученное при двух приближениях (объем образца много меньше объема резонатора и образец – бесконечный длинный стержень), связывает резонансную частоту и диэлектрическую постоянную или проницаемость среды, заполняющей резонатор [20].

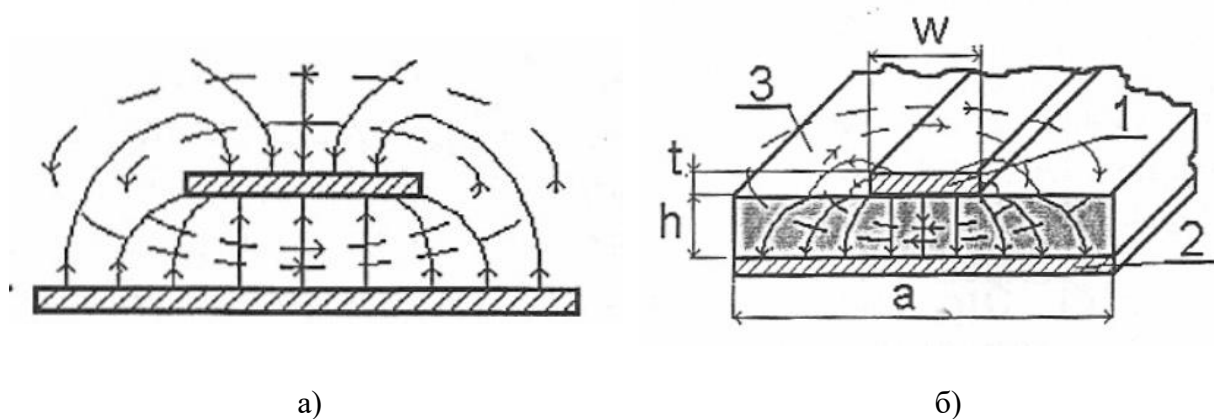
$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{\iiint_{V_s} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* + (\mu_1 - \mu_2) \vec{H}_2 \cdot \vec{H}_1^*] dV}{\iiint_{V_0} [\varepsilon_1 \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* + \mu_1 \vec{H}_2 \cdot \vec{H}_1^*] dV}, \quad (1)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость пустого резонатора, ε_2 – диэлектрическая проницаемость нагруженного резонатора, ω_1 – частота пустого резонатора, ω_2 – частота нагруженного резонатора, \vec{E}_1^* – напряженность электрического поля без образца, \vec{E}_2 – напряженность электрического поля с образцом, V_0 – объем резонатора, V_s – объём образца, μ_1 – магнитная проницаемость пустого резонатора, μ_2 – магнитная проницаемость нагруженного резонатора.

Из результатов, полученных авторами работы [20], следует, что фундаментальным принципом для определения диэлектрических свойств из измерения возмущений электромагнитного поля в резонаторе при помещении образца в его полость, является изменение резонансной частоты и добротности резонатора. Электромагнитные свойства материалов могут быть найдены, если изменения резонансной частоты и добротности резонатора определены точно. Изменение частоты, вызванное помещенным образцом, может быть рассчитано по

уравнению (1) без какого-либо приближения. Уравнение (1) является основной формулой для возмущенного резонатора, если электрическая проводимость стенок резонатора является бесконечной и изменение поля, вызванное помещенным образцом, можно рассматривать как малое возмущение. Для удобства расчета при определении диэлектрической проницаемости образца обычно используются нечетные моды резонатора. Особенностью при определении диэлектрических свойств образца является то, что образец мал и это позволяет легко восстановить его параметры и добиться хорошей точности измерений.

В работе [21] рассматривается резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей, основанный на применении модифицированных полосковых линий в качестве датчиков. Отрезок несимметричной полосковой линии рассматривается в качестве резонаторного датчика (рисунок 1). На рисунке 1 обозначены: 1 и 2 – проводники, 3 – диэлектрическая подложка, W – ширина полосковой линии, a – ширина экранирующей пластины, h – толщина диэлектрической подложки, t – толщина полоски.



а) с воздушным заполнением между проводниками; б) с диэлектрической подложкой между проводниками

Рисунок 1 – Несимметричная полосковая линия [21]

Рассматриваемую в статье полосковую линию с зигзагообразной металлической полоской авторы рассматривали как длинную линию. При этом считали, что взаимным влиянием электромагнитных полей участков этой линии можно пренебречь при расчете характеристик распространения электромагнитных

волн вдоль такого отрезка линии. Волна квази-ТЕМ в рассматриваемой полосковой линии переносит часть электромагнитной энергии в подложке, а часть – в окружающем пространстве, в работе [21] это была жидкость, концентрация которой подлежит определению.

Информативными параметрами резонаторных датчиков могут, в частности, служить: резонансная частота электромагнитных колебаний отрезка полосковой линии, рассматриваемого в качестве резонатора; резонансная частота электромагнитных колебаний отрезка полосковой линии, рассматриваемого в качестве оконечной нагрузки отрезка длинной линии. Следовательно, зная параметры измерительной ячейки в виде отрезка несимметричной полосковой линии – резонатора, а также начальные параметры данной ячейки, можно, измерив резонансную частоту заполненной жидкостью измерительной ячейки (полосковой линии) и используя рассмотренные в статье методику измерений и полученные соотношения, найти величину того или иного измеряемого физического параметра контролируемой жидкости, в частности, концентрацию смеси веществ (раствора).

В статье [22] представлен новый подход к измерению диэлектрических свойств материалов. Предлагаемый подход основан на измерении коэффициента отражения от частично заполненного диэлектриком волновода (рисунок 2).

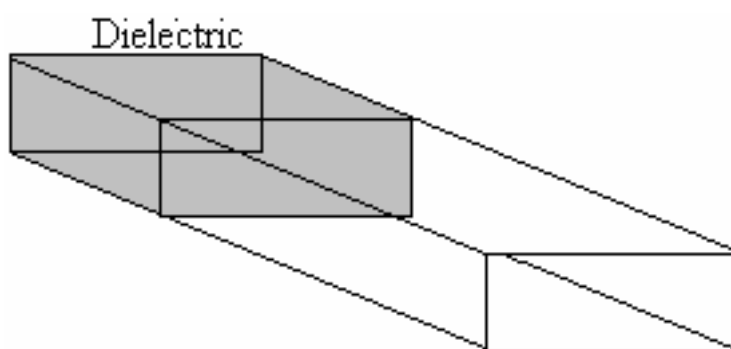


Рисунок 2 – Схематичное изображение волновода с частично заполненным диэлектриком для измерения действительной части диэлектрической проницаемости [22]

На рисунке 3 показаны результаты измерения коэффициентов отражения для волновода с разными заполнениями. В первом случае разное заполнение для одного и того же материала дает разные значения коэффициента отражения. Во

втором случае для одного и того же заполнения волновода для разных материалов изменяется коэффициент отражения.

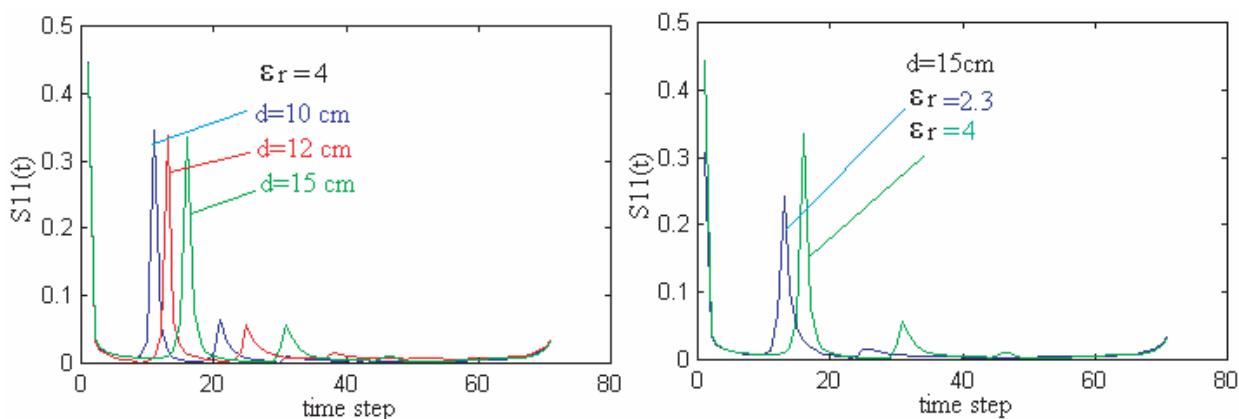
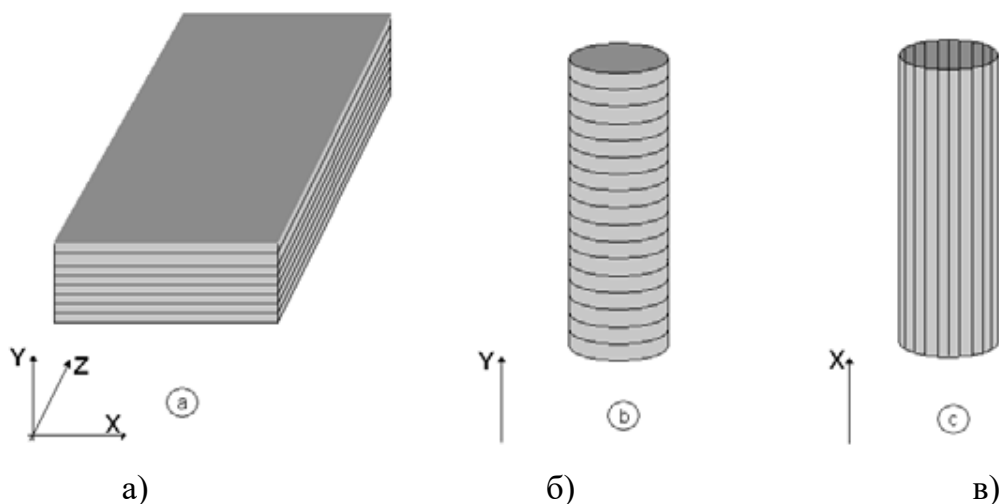


Рисунок 3 – Коэффициенты отражения для волновода с разными заполнениями [22]

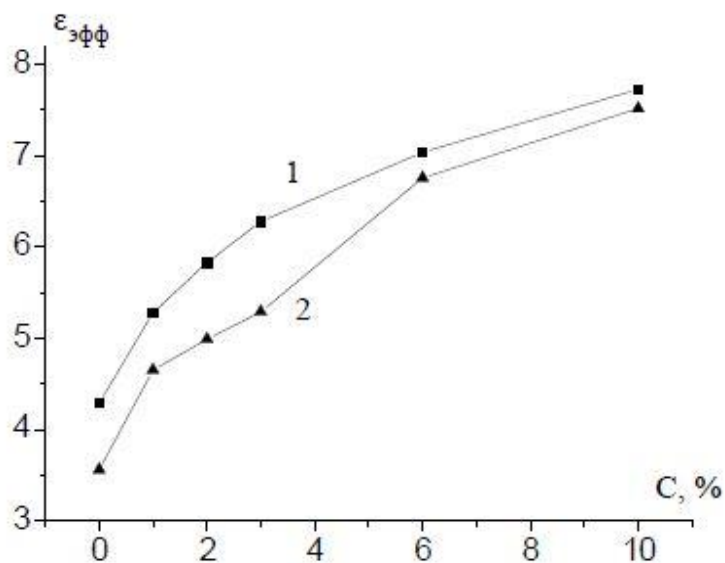
Таким образом, в [22] была использована комбинация временного и частотного подходов для расчета диэлектрической проницаемости материалов. Проведено моделирование процедуры расчета диэлектрической проницаемости для микрополосковых линий и волноводной системы. Полученные результаты хорошо согласуются с известными данными. Рассмотренный метод применялся как для измерения диэлектрической проницаемости материалов, так и для обнаружения местоположений разрывов линий передачи. Данным методом можно непосредственно измерить диэлектрическую проницаемость диэлектрических материалов и разрывы линии передачи. Измерения выполняются для частотной области, и в этом заключается большое преимущество данного подхода. Предлагаемый метод может быть использован для определения характеристик многих видов диэлектрических материалов. Также этот подход может быть разработан для измерения материалов с потерями.

В статье [23] представлены результаты экспериментальных исследований резонаторным методом эффективной диэлектрической проницаемости композитных материалов, состоящих из диэлектрической матрицы $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ с добавками чешуйчатого графита (рисунок 4, 5). Исследования проводились с использованием объемного прямоугольного резонатора в диапазоне 8 – 12 ГГц.



а) исходный образец; б) образец с ориентированными слоями графита перпендикулярно оси; в) образец со слоями, параллельными оси цилиндра

Рисунок 4 – Образцы со слоями ориентированных чешуек графита [23]



1 – измерения резонаторным методом; 2 – измерения волноводным методом

Рисунок 5 – Концентрационная зависимость $\epsilon'_{эфф}$ однородных образцов [23]

Из рисунка 5 видно, что эффективная диэлектрическая проницаемость имеет типичную концентрационную зависимость и увеличивается с ростом концентрации проводящего наполнителя.

Результаты исследований могут быть полезны при создании высокоэффективных слабоотражающих радиопоглощающих покрытий, снижающих общий уровень электромагнитного излучения, для различного рода

многослойных экранов поглотителей, изготовлении компонентов поляризационных фильтров.

В [24] авторами рассмотрена задача возбуждения прямоугольного металлического резонатора через круглое отверстие в стенке (рисунок 6).

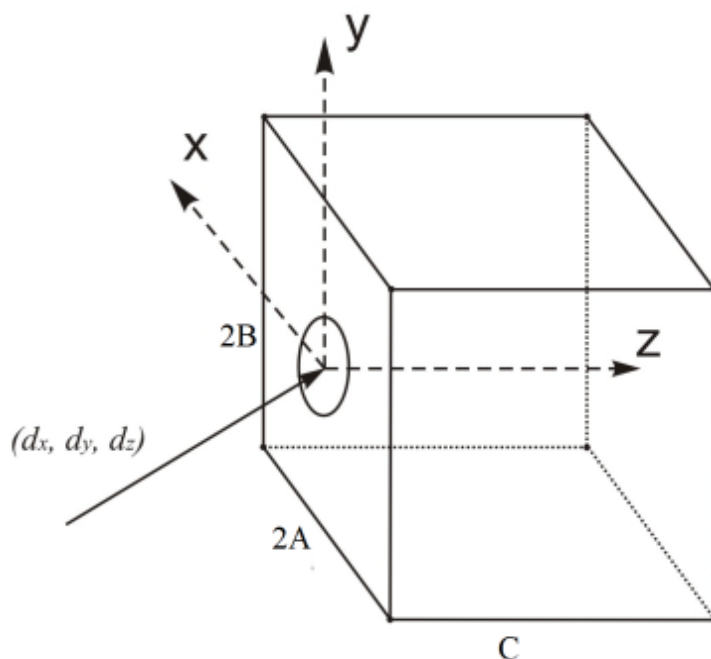


Рисунок 6 – Прямоугольный металлический резонатор с круглым отверстием в боковой стенке [24]

Задача возбуждения металлических резонаторов электромагнитным импульсом через отверстие в поверхности в [24] решена с помощью преобразования Фурье в частотной области. В качестве геометрического масштаба выбиралась длина ребра резонатора, и задача приводилась к безразмерному виду. При этом остается только один геометрический параметр – безразмерный диаметр отверстия.

Полученные авторами работы результаты аналитических, численных и экспериментальных оценок параметров электромагнитных полей внутри резонатора показали хорошее совпадение, как по форме проникающего через отверстие сверхширокополосного импульса, так и по характеру изменения его амплитуды по мере удаления от отверстия внутри оболочки. Авторы указывают на то, что результаты расчета с использованием численных методов (программного

пакета CST) по сравнению с аналитическими методами даёт лучшее совпадение с результатами эксперимента.

В статье [25] было проведено исследование комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости для оценки вклада в магнитные характеристики исследуемых образцов различных объемных долей наполнителей магнитодиэлектрических композитов, кобальтовых, ферритовых нановключений. Измерениями широкополосного резонатора оценивались диэлектрические свойства.

Также авторами проводились исследования структуры и поверхностной морфологии композитных образцов для определения размера и однородности распределения нановключений. Средний размер наночастиц феррита кобальта составляет ~ 10 нм. Действительная часть диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости образцов варьировалась от $1 - 2,905$ до $1,01 - 1,05$ с увеличением содержания включения от 1 до 5%, соответственно.

Показано, что метод возмущения может быть легко использован для оценки эффективной диэлектрической и магнитной проницаемости. Увеличение μ'' с ростом объемной фракции наполнителя авторы объясняют преобладанием движения доменных стенок. Измеренный авторами коэффициент отражения от магнитодиэлектрической подложки показал результаты, сравнимые со стандартной эпоксидной подложкой, применяемой для изготовления микрополосковых антенн.

Одним из вариантов снижения уровня электромагнитного излучения (ЭМИ) является использование поглотителей электромагнитного излучения. Создание хорошо поглощающих электромагнитное излучение широкодиапазонных структур имеет большое практическое значение.

В [26] авторами было приведено обоснование выбора материала для изготовления поглотителя электромагнитного излучения. Описаны конструкции многослойного композиционного поглотителя, а также представлены результаты исследования коэффициентов отражения и передачи многослойного композиционного поглотителя электромагнитного излучения на основе порошка диоксида титана в диапазоне частот $0,7 - 17$ ГГц.

Из данного исследования авторы работы сделали вывод: многослойный экран на основе композиции диоксида титана и кермета (резистивного сплава)

является эффективным преобразователем электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне; разработанный поглотитель ЭМИ обладает комплексом необходимых технических свойств: механической прочностью, технологичностью, стабильностью электрических характеристик.

Способность оценить электрофизические параметры материала является огромным преимуществом при проведении научно-исследовательских работ. Поэтому разработка методик измерения, принципов построения измерительной аппаратуры электрофизических параметров материалов на высоких, сверхвысоких и крайне высоких частотах является актуальной.

В [27] был рассмотрен один из широкополосных методов определения диэлектрической проницаемости – метод линии передачи. В качестве используемой линии передачи был использован стандартный прямоугольный волновод МЭК R100. Были рассмотрены основные плюсы и минусы данного способа. Выявлены основные неоднозначности в определении диэлектрической и магнитной проницаемости. Также был рассмотрен случай с частично заполненным волноводом и способ корректировки полученного в таком случае резонатора. Коаксиальная линия передачи не использовалась, так как изготовить тороидальный образец гораздо сложнее, чем прямоугольный, но в случае с коаксиальной линией можно реализовать измерения на более низких частотах, так как отсутствует ограничение в виде критической частоты. Была написана прикладная программа в Matlab, которая реализует пересчет измеренных параметров в магнитную и диэлектрическую проницаемость.

В работе [28] предложена математическая модель для расчета эффективного тензора диэлектрической проницаемости композиционных материалов на основе метода асимптотического осреднения периодических структур. Для численного решения локальной задачи электростатики использован метод конечных элементов. Также проведены тестовые расчеты эффективных диэлектрических характеристик 3D ортогонально-армированного композита.

Расчет действительной части электрического псевдопотенциала ϑ для задачи L3 (рисунок 7) производился в композите с коэффициентом армирования $\varphi_f = V_f / V_m = 0,18$, где V_f, V_m – содержание волокон и матрицы, соответственно.

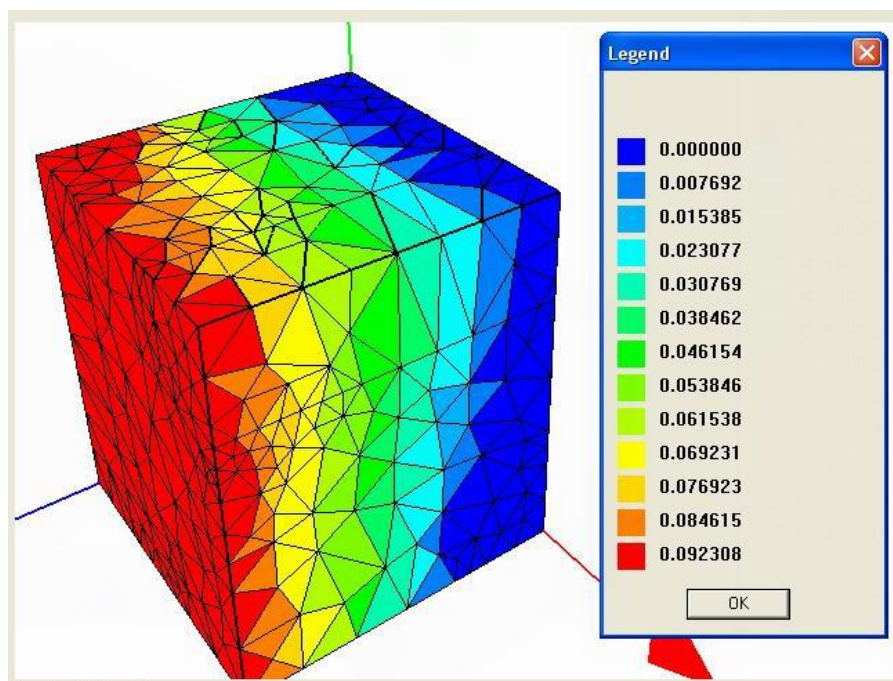


Рисунок 7 – Распределение действительной части псевдопотенциала $\text{Re}\varphi$ (безразмерное значение) [28]

Результаты показали, что предложенная модель расчета обеспечивает высокую точность вычислений эффективных диэлектрических характеристик композиционных материалов со сложными структурами армирования. Данная математическая модель может быть применена для прогнозирования диэлектрических характеристик новых синтезируемых материалов.

В статье [29] реализованы методы одновременного измерения толщины и удельной электропроводности слоев в полупроводниковых n^+n -структурах и в структурах с полуизолирующей подложкой, выполняющих роль нарушения периодичности в одномерном волноводном фотонном кристалле, по спектрам отражения и прохождения электромагнитного излучения. Реализован модифицированный метод СВЧ-магнитосопротивления для измерения подвижности свободных носителей заряда в сильнолегированном эпитаксиальном слое полупроводниковой структуры, при её размещении после фотонного кристалла в центре поперечного сечения прямоугольного волновода, с использованием частотных зависимостей коэффициентов прохождения и отражения, измеренных при воздействии магнитного поля и в его отсутствии. Реализован метод измерения параметров нанометровых металлических слоев,

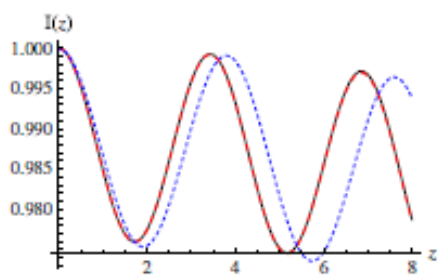
нанесенных на керамическую подложку, с использованием волноводно-диэлектрического резонанса.

В [30] предложен подход, позволяющий получить нормировочный множитель для метода возмущения. Метод проверен на примере бинарной волноводной решетки, для которой известно приближенное решение. Авторы показали, что для матричного метода третьего порядка нормировочный множитель дает приближенное решение, совпадающее с точным известным решением.

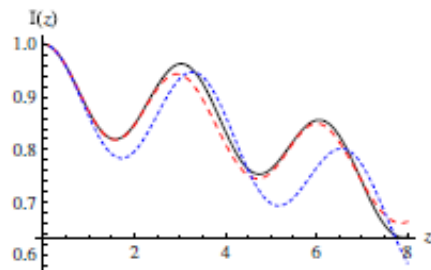
Авторы пишут, что альтернативой к методу возмущений при решении задач теории возмущений является матричный метод. Эта новая схема, основанная на реализации треугольной матрицы. Использование данного метода предполагает внесение поправки к волновой функции, а энергия может содержаться только в одном выражении, в отличие от стандартной теории возмущений, где необходимо их вычислять. Кроме того, матричный метод может также использоваться, когда необходимо найти унитарную эволюцию оператора для невозмущенного гамильтониана, но это не поможет найти его собственные состояния.

На рисунке 8 показано численное сравнение напряженности поля в зависимости от расстояния распространения z с использованием точного решения (сплошная линия), решения третьего порядка (красная пунктирная линия) и решение методом малого возмущения (синяя пунктирная линия) при малых $\alpha = 0,1$ и больших $\alpha = 0,3$ возмущениях для параметра несогласования постоянной распространения $\omega = 0,9$ для первых трех направляющих.

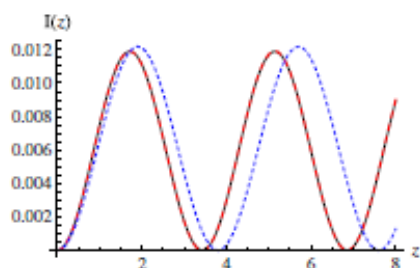
Таким образом, авторы получили нормировочный множитель для метода возмущения, который дополняет теоретический анализ матричного метода. Решения уравнений с помощью метода возмущений, описывающих бинарную волноводную решетку, полученные с применением этого метода, очень точны. С другой стороны, становится очевидным улучшение этого метода в отношении результатов с использованием метода малых амплитуд. Следовательно, оценка условий более высокого порядка может дать правильное решение для рассматриваемой авторами системы.



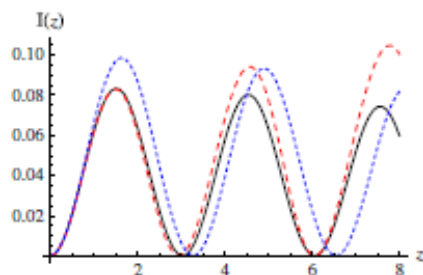
(a) Guide 1



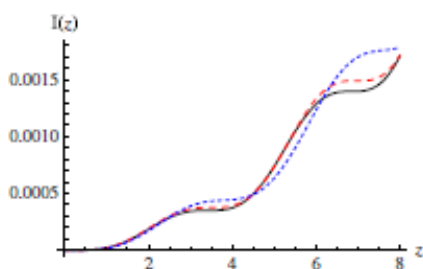
(a) Guide 1



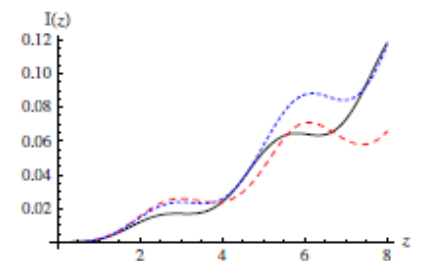
(b) Guide 2



(b) Guide 2



(c) Guide 3



(c) Guide 3

а)

б)

а) зависимость интенсивности поля от расстояния распространения z с использованием точного решения (сплошная линия), решение третьего порядка (красная пунктирная линия) и решение методом малых амплитуд (синяя пунктирная линия) с $\alpha = 0,1$ и $\omega = 0,9$ для первых трех направляющих; б) зависимость напряженности поля от расстояния распространения z с использованием точного решения (сплошная линия), решение третьего порядка (красная пунктирная линия) и решение методом малых амплитуд (синяя пунктирная линия) с $\alpha = 0,3$ и $\omega = 0,9$ для первых трех направляющих

Рисунок 8 – Численное сравнение предложенного решения с точным,

и с методом малых амплитуд [30]

1.2 Исследования материалов с большими потерями

Метод определения диэлектрической и магнитной проницаемости для образцов с высоким показателем преломления и разной формой представлен в работе [31]. Метод позволяет получить тензоры магнитной и диэлектрической

проницаемости элементов из измерения коэффициента отражения от частично заполненного короткозамкнутого прямоугольного волновода с образцом, имеющим электрически малые размеры. Измерения выполняются для двух изотропных, с большими потерями тороидальных магнитных композитов. Для проверки достоверности результатов авторы используют моделирование и измерения, полученные в прямоугольном объемном резонаторе (рисунок 9) и коаксиальной линии.

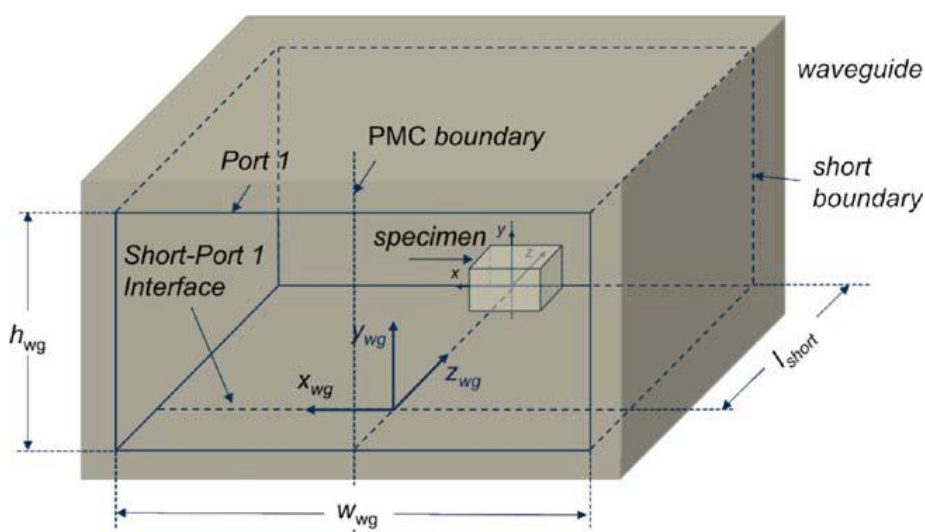


Рисунок 9 – Схематическое изображение короткозамкнутого волновода и помещенного в него образца [31]

Чтобы исследовать все элементы диэлектрической и магнитной проницаемостей, необходимо выполнить минимум два измерения. Для исследования характеристик образец размещается на одном уровне в два разных положения в резонаторе: на малое и некоторое увеличенное расстояние от короткого конца волновода, соответственно. Чтобы воспользоваться симметрией в обеих плоскостях при расчетах, образец всегда находится в одном и том же сечении волновода. В целях дальнейшего ускорения моделирования, используется теория для получения S -параметров при двух разных положениях образца относительно короткой стенки резонатора.

Показанный метод учитывает требуемые параметры образца материала из измерения коэффициента отражения, выполненные в частично заполненном короткозамкнутом прямоугольном волноводе. Авторы утверждают, что данная

работа демонстрирует прогресс в современном направлении исследования характеристик материала. Такой подход позволяет использовать электрически малый образец нерегулярной формы при измерениях на нескольких частотах, и может быть непосредственно применен для измерений характеристик образцов анизотропных материалов.

Авторы статьи [32] рассматривают возможности измерения параметров диэлектриков с большими коэффициентами поглощения при помощи резонаторных СВЧ-датчиков, использующих как основные, так и высшие моды.

Вследствие перераспределения вкладов резонирующей и бегущих волн вблизи резонансной частоты получены почти линейные зависимости сдвига фаз, наклон которых определяется величиной потерь. Увеличение длины резонатора и величины потерь приводит к пропорциональному росту коэффициента ослабления. Для $\sigma = 5$ ослабление составляет 40 дБ для синфазной волны и около 0 дБ для резонирующей. Однако при увеличении $\sigma > 20$ рост коэффициента ослабления составляет примерно 30 дБ на октаву.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что заполненные резонаторы могут представлять интерес для измерения параметров сред с большими потерями. Но для принятия решения об эффективности применения конкретной конструкции резонатора необходима экспериментальная проверка.

1.3 Методы расчета комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости

В [33] авторы исследовали прямоугольный объемный резонатор, работающий на волнах типа H_{10p} , и проанализировали ошибки, которые возникли в результате наличия воздушного зазора из-за того, что длина образца была меньше высоты прямоугольного резонатора.

Если условие метода возмущения выполнено и длина помещенного в резонатор образца исследуемого материала равна высоте полости резонатора, то справедливо считать, что $E = E_0$, электрическое поле внутри образца равно невозмущенному полю. Наряду с этим предположением, расчетные формулы (2) и (3) для комплексной диэлектрической проницаемости имеют вид:

$$\varepsilon_r' - 1 = \frac{(f_0 - f_s) V_c}{2f V_s}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_r'' = \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V_c}{4V_s}. \quad (3)$$

где ε_r' и ε_r'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости; V_c и V_s – объемы полости резонатора и образца, соответственно; f_0 и Q_0 – резонансная частота и добротность пустого резонатора, соответственно; f_s и Q_s – резонансная частота и добротность резонатора с образцом, соответственно [33].

Уравнения (2) и (3) являются точными решениями для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости, когда условие метода возмущения выполняется, то есть электрическое поле внутри образца исследуемого материала – векторная сумма приложенного поля и деполаризующего поля. Однако, точность уравнений (2) и (3) также зависит от длины помещенного образца материала в резонатор. Другими словами, эти уравнения требуют, чтобы длина помещенного образца была равна высоте полости резонатора.

При малых сдвигах частоты, и условии, что длина помещенного образца материала короче, чем высота полости резонатора, или образец лишь частично заполняет высоту полости, то справедливость предыдущего предположения $E = E_0$ не является достоверной. Впоследствии оценка уравнений (2) и (3) будет давать неверные результаты расчета комплексной диэлектрической проницаемости.

Уравнения (4) и (5) учитывают длину образца и деполаризующий фактор. Полученные авторами уравнения (4) и (5) позволяют скорректировать получаемые результаты.

$$\frac{f_s - f_0}{f_s} = \left\{ N \left[(\varepsilon_r')^2 - 2\varepsilon_r' - \varepsilon_r'' + 1 \right] + (-\varepsilon_r' + 1) \right\} \left(2 \frac{V_s}{V_c} \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \right) = \left[\varepsilon_r'' - 2N(\varepsilon_r' - 1)\varepsilon_r'' \right] \left(2 \frac{V_s}{V_c} \right), \quad (5)$$

где ϵ_r' и ϵ_r'' – действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости; V_c и V_s – объемы полости резонатора и образца, соответственно; f_0 и Q_0 – резонансная частота и добротность пустого резонатора, соответственно; f_s и Q_s – резонансная частота и добротность резонатора с образцом, соответственно; N – деполяризующий фактор [33].

Авторы приводят результаты расчета диэлектрической проницаемости с учетом поправок на длину образца (рисунок 10).

Material sample	Length of sample (mm)	From Eqs (5a-b)		From Eqs (10a-b) with Ne	
		ϵ_r'	ϵ_r''	ϵ_r'	ϵ_r''
Teflon	22.1	2.08	--	2.08	--
	15	2.06	--	2.07	--
	10	2.02	--	2.07	--
	5	1.86	--	2.04	--
Magnesium Fluoride	22.1	5.08	--	5.08	--
	15	4.87	--	5.09	--
	7	3.89	--	5.06	--
Plexiglas	4.1	1.81	0.10	2.51	0.22

Рисунок 10 – Значения диэлектрической проницаемости, рассчитанные по разным формулам [33]

Таким образом, мы снова убеждаемся, что при экспериментальном исследовании материалов для получения достоверных результатов нужно учитывать ошибки расчета, появляющиеся из-за неточного положения образца в полости резонатора, размеров образца, распределения поля внутри образца и др.

В [25] авторы проводили исследования комплексной магнитной проницаемости образцов различных объемных долей магнитодиэлектрических композитов с кобальтовым ферритовым нановключением.

Для измерения комплексной магнитной проницаемости экспериментальные образцы помещали горизонтально в центр полости резонатора в максимум магнитного поля и минимум электрического поля. Измерения проводились при

комнатной температуре в резонаторе TE₁₀₂, работающем на частоте 9,86 ГГц без какого-либо внешнего магнитного смещения, приложенного к образцам.

Авторы проводили расчет комплексной магнитной проницаемости, используя формулы (6) и (7):

$$\mu' = \frac{1}{k} \left[\frac{V_c}{V_s} \right] \left[(f_c - f_s) / f_s \right] + 1 \quad (6)$$

$$\mu'' = \frac{1}{2k} \left[\frac{V_c}{V_s} \right] \left[\left(\frac{1}{Q_s} \right) - \left(\frac{1}{Q_c} \right) \right] \quad (7)$$

где μ' и μ'' – действительная и мнимая части магнитной проницаемости; V_c и V_s – объемы полости резонатора и образца, соответственно; f_c и Q_c – резонансная частота и добротность пустого резонатора, соответственно; f_s и Q_s – резонансная частота и добротность резонатора с образцом, соответственно [25].

Наблюдения показали, что μ' почти не изменяется с увеличением объемной доли нановключений, но μ'' увеличивается с увеличением объемной доли.

Это явление можно объяснить движением доменной стенки. Движение доменной стенки чувствительно как к микроструктуре поликристаллического феррита (размер зерна феррита), так и к объему. Уменьшение размера частиц обычно приводит к уменьшению количества доменов до одного домена. Следовательно, полученные спектры могут быть учтены приращением движения доменной стенки, так как размеры частиц нановключений в полимерной матрице достаточно велики, чтобы приблизиться к многодоменным структурам. Другой причиной наблюдаемых μ' и μ'' результатов может быть высокая магнитная анизотропия CoFe₂O₄ при меньших размерах. В ферритах на основе кобальта увеличение магнитной анизотропии накладывает ограничения на вращение магнитных ионов, и в результате их ориентация связана с определенным кристаллографическим направлением. Но по наблюдаемым закономерностям μ' и μ'' можно сказать, что в этом случае доминирует движение доменной стенки.


РЕШЕНИЕ

об объеме представления текста магистерской диссертации, содержащего
закрытую информацию

На заседании кафедры радиоэлектроники РФФ рассмотрена магистерская диссертация студентки 731 гр. Поливановой Анны Сергеевны «Прямоугольный резонатор для исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями».

Магистерская диссертация «Прямоугольный резонатор для исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями» может быть представлена в открытой печати в объеме введения и первого раздела, т. к. содержание работы, представленное в разделах два, три и заключении, готовится к опубликованию.

Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор



В. П. Якубов
«17» июня 2019 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Егоров В. Н. Микроволновые диэлектрические резонаторы в физических измерениях: Автореф. дисс. докт. физ. – мат. наук // Учреждение Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений ФГУП "ВНИИФТРИ". – Иркутск. – 2013. – С. 4 – 95.

2 Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на с.в.ч. / В. Н. Егоров // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 5 – 38.

3 Gorriti A. G. Comparison of the different reconstruction techniques of permittivity from S-parameters / A. G. Gorriti, E. C. Slob // Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 2005. – V. 43. – No. 9. – P. 2051 – 2057.

4 Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell / K. Folgero // Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on. – 1998. – V. 47. – No. 4. – P. 881 – 885.

5 Bois K. J. Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials / K. J. Bois, L. F. Handjojo, A. D. Benally // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – V. 48. – No. 6. – P. 1141 – 1148.

6 Пархоменко М. П. Резонаторный метод для определения диэлектрических и магнитных параметров материалов и экспериментальная установка на его основе в миллиметровом диапазоне волн / М. П. Пархоменко, Д. С. Калёнов, Ю. Ф. Абакумов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ – техника. – 2013. Вып. 2. – С. 43 – 57.

7 Ложкин Л. Д. Моделирование электрофизических параметров тонких образцов на основе объёмных резонаторов в среде проектирования Microwave Studio / Л. Д. Ложкин, А. А. Солдатов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12. – С. 23 – 30.

8 Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн // М.: Наука. – 1978. – С. 145 – 183.

9 Дорофеев И. О. Квазиоптический СВЧ резонатор с литым остеклованным магнитным микропроводом / И. О. Дорофеев, Г. Е. Дунаевский, И. А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 9/2. – С. 30 – 32.

10 Завьялов А. С. Измерение параметров материалов на сверхвысоких частотах / А. С. Завьялов, Г. Е. Дунаевский. – Томск: Изд-во ТГУ, 1986. – 355 с.

11 Шестопалов В. Д. Методы измерения диэлектрических проницаемостей вещества на СВЧ / В. Д. Шестопалов, К. П. Яцук // Успехи физических наук. – 1961. – Т. 24. – Вып. 4. – С. 721 – 755.

12 Esfahani N. N. Miniaturized coaxial cavity resonator based on anisotropic negative permeability metamaterial loading / N. N. Esfahani, P. Rezaee, K. Schunemann, R. Knochel // Microwave and optical technology letters. – 2012. – Vol. 54. – No. 3. – С. 595 – 599.

13 Любченков А. В. Анализ методов измерения электродинамических параметров материалов, поглощающих сверхвысокочастотное электромагнитное излучение / А. В. Любченков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 9. – С. 17 – 19.

14 Егоров В. Н. Метод H_{01p} – резонатора для измерения электромагнитных параметров стержней, трубок, порошков и жидкостей / В. Н. Егоров, Е. Ю. Токарева // Изв. вузов. Физика. – 2013. – № 8/2. – С. 350 – 352.

15 Chen L. G. Amendment of cavity perturbation method for permittivity measurement of extremely low-loss dielectrics / L. G. Chen, C. K. Ong, B. T. Tan // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 1999. – V. 48. – No. 6. – P. 1031 – 1037.

16 Патент РФ № 90 911, 20.01.2010. Открытое акционерное общество "научно-исследовательский институт "феррит-домен". Устройство для измерения комплексной диэлектрической проницаемости тонкопленочных материалов на сверхвысоких частотах // Патент России, 2010.

17 Nakamura T. Precise measurement of complex permittivity of materials for telecommunications devices / T. Nakamura, Y. Nikawa // Journal of Telecommunications and Information Technology. – 2011. – V. 1. – No. 3. – P. 66 – 70.

18 Komarov V. V. Modeling control over determination of dielectric properties by the perturbation technique / V. V. Komarov, V. V. Yakovlev // Microwave and optical technology letters. – 2003. – V. 39. – No. 6. – P. 443 – 446.

19 Gangwar R. K. Study of dielectric constant of $(1-x) \text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{TiO}_3$ (ZMT) ceramic material at microwave frequencies as a function of composition x and processing

temperature / R. K. Gangwar, S. P. Singh, M. Choudhary, N. K. Singh, D. Kumar, O. Parkash // Journal of Electromagnetic Analysis & Applications. – 2010. – No. 2. – P. 664 – 671.

20 Guangyu L. Study of Determination of Microwave Dielectric Properties Based on Resonance Cavity Perturbation Method / L. Guangyu, G. Hongmin, Y. Xiangzhi, F. Yuanchun // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vols. 347 – 350. – P. 241 – 247.

21 Совлуков А. С. Резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с применением полосковых линий / А. С. Совлуков, А. А. Маслов, В. В. Яценко, А. Р. Власова // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 271 – 275.

22 Moradi G. Measuring the permittivity of dielectric materials using STDR approach / G. Moradi, A. Abdipour // Progress in Electromagnetics Research. – 2007. – P. 357 – 365.

23 Бычков И. В. Исследование эффективной диэлектрической проницаемости композитного материала $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ – графит / И. В. Бычков, Д. В. Дубровских, И. С. Зотов, А. А. Федий // Вестник Челябинского государственного университета. Физика. – 2011. – № 7 (222). – Вып. 9. – С. 7 – 15.

24 Андреев А. Ю. Возбуждение прямоугольного резонатора с круглым отверстием сверхширокополосным видеоимпульсом / А. Ю. Андреев, В. А. Вялов, Б. Н. Городецкий, В. В. Залипаев, М. С. Сидоренко // Технологии ЭМС. – 2016. – № 4 (59). – С. 17 – 24.

25 Borah K. Magnetodielectric composite with ferrite inclusions as substrates for microstrip patch antennas at microwave frequencies / K. Borah, N. S. Bhattacharyya // Composites: Part B. – 2012. – No. 43. – P. 1309 – 1314.

26 Молодечкин М. О. Методика формирования и характеристики композиционного поглотителя электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе диоксида титана / М. О. Молодечкин, В. А. Богущ // Доклады БГУИР. – 2015. – № 4 (90). – С. 109 – 115.

27 Чадаев А. А. Методы определения электрофизических параметров материалов: пояснительная записка // Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург. – 2014. – С. 3 – 78.

28 Димитриенко Ю. И. Моделирование диэлектрических характеристик композиционных материалов на основе метода асимптотического осреднения / Ю. И. Димитриенко, А. П. Соколов, М. Н. Маркевич // Наука и образование, электронный научно-технический журнал. – 2013. – № ФС77. – С. 49 – 64.

29 Латышева Е. В. Резонансные СВЧ-методы многопараметровых измерений эпитаксиальных полупроводниковых структур с нанометровыми металлическими слоями: дисс. канд. физ. – мат. наук // Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского. – Саратов. – 2016. – С. 2 – 103.

30 Villegas-Martínez B. M. Normalization corrections to perturbation theory based on a matrix method / B. M. Villegas-Martínez, H. M. Moya-Cessa, F. Soto-Eguibar // Journal of Modern Optics. – 2017. – P. 1 – 9.

31 Scott M. M. Permittivity and permeability determination for high index specimens using partially filled shorted rectangular waveguides / M. M. Scott, D. L. Faircloth, J. A. Bean, K. W. Allen // Microwave and optical technology letters. – 2016. – Vol. 58. – No. 6. – P. 1298 – 1301.

32 Панченко А. Ю. Измерение параметров диэлектриков с большими коэффициентами поглощения резонаторными методами в СВЧ диапазоне / А. Ю. Панченко // Радиотехника. – 2001. – № 4. – С. 12 – 15.

33 Mi L. A new cavity perturbation technique for accurate measurement of dielectric parameters / L. Mi, N. Mohammed // Microwave Symposium Digest, 2006. – P. 1630 – 1633.

34 Баскаков С. И. Электродинамика и распространение радиоволн // М.: ЛИБРОКОМ. – 2012. – С. 243 – 310.

35 Erdogan L. Dielectric properties of oil sands at 2,45 GHz with TE_{1,0,11} mode determined by a rectangular cavity resonator / L. Erdogan, C. Akyel // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 2011. – V. 45. – No. 1. – P. 15 – 23.

36 Говорков В. А. Электрические и магнитные поля // М.: «Государственное энергетическое издательство». – 1960. – С. 132 – 157.

37 Сусяев В. И. Прямоугольный многомодовый сверхвысокочастотный резонатор. Методическое пособие / В. И. Сусяев – Томск: Изд-во Томск. ун-та. – 1994. – С. 4 – 16.

38 Гуреев А. В. Расчет добротности СВЧ резонаторов / А. В. Гуреев // Радиотехника. – 1988. – № 5. – С. 79 – 81.

39 Поливанова А. С. Оценка погрешности метода малых возмущений при расчете диэлектрической проницаемости материалов / А. С. Поливанова // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. – С. 20.

40 Альвис. – URL:<http://www.kaprolon-alvis.ru/info/electro.html>. (Дата обращения 25.05.2019).

41 Поливанова А. С. Исследование комплексной диэлектрической проницаемости композита, содержащего углеродные включения / А. С. Поливанова // Труды XVI Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2019 (в печати).

42 СТО ТГУ 032 – 2009 Методика измерений эффективных значений относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь нанопорошков и композитов на их основе в диапазоне сверхвысоких частот. Прямоугольный объемный резонатор. Введ. 31.04.2009 / Томский государственный университет. Томск, 2009. 8 с.

43 Качусова А. О. Влияние ультразвуковой обработки на электромагнитные характеристики композитов на основе углеродных нанотрубок / А. О. Качусова // Труды XII Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – С. 76 – 78.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Отчет о патентных исследованиях

ЗАДАНИЕ

на проведение патентных исследований

Наименование работы (темы): Прямоугольный резонатор для исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями.

Шифр работы (темы):

Этап работы _____, срок его выполнения 01.02.2019-01.04.2019

Задачи патентных исследований: исследовать способы измерения электромагнитных характеристик материалов с большими потерями резонаторным методом.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. Начало. Окончание.	Отчетные документы
1. Исследование технического уровня		Поливанова А.С.		отчет о поиске
2. Анализ тенденций развития		Поливанова А.С.		отчет о поиске

Руководитель
подразделения
исполнителя работы



личная подпись

Г. Е. Дунаевский

расшифровка подписи

28.01.2019

дата

Руководитель НИР



личная подпись

О. А. Доценко

расшифровка подписи

28.01.2019

дата

Регламент поиска

28.01.2019

дата составления регламента

Наименование работы (темы) Прямоугольный резонатор для исследования электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями

Номер и дата утверждения задания от 26.01.2019 Этап работы _____

при необходимости

Цель поиска информации (в зависимости от задач патентных исследований, указанных в задании)

Исследовать методы измерений электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне.

Определение достигнутого технического уровня в РФ и ведущих зарубежных странах.


Формирование групп патентов – аналогов для дальнейшей оценки перспективности защиты результатов научных исследований.

Обоснование регламента поиска поиск провести в базах ФИПС и USPTO

Начало поиска 01.02.2019 Окончание поиска 01.04.2019

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспективн ость	Наименование информационной базы
		патентные		НТИ			
		Наименование	Классификацио нные рубрики МПК	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8
Методы измерений электромагнитн ых характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне	Россия, США	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)				2003 – 2019	База данных ФИПС (Россия) База данных USPTO (США)

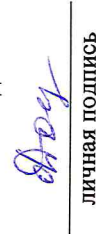
Руководитель подразделения
исполнителя работы


личная подпись

Г. Е. Дунаевский
расшифровка подписи

22.04.2019
дата

Руководитель НИР


личная подпись

О. А. Доленко
расшифровка подписи

22.04.2019
дата

ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

1 Поиск проведен в соответствии с заданием №__ от 26.01.2019 и Регламентом поиска № от 28.01.2019.

2 Этап работы _____.

при необходимости

3 Начало поиска 01.02.2019. Окончание поиска 01.04.2019.

4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – провести поиск патентов аналогов наиболее значимых патентов, обнаруженных при проведении патентных исследований. Более детально проанализировать направления исследований ведущих в рассматриваемых областях фирм и университетов. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

6 Материалы, отобранные для последующего анализа.

Таблица А.1 – Патентная документация

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Методы измерений электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне	Патент РФ № С1 2 539 125 МПК	ОАО "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология" № 2 539 125	Устройство для измерения параметров диэлектриков на сверхвысоких частотах	Действует
	Патент РФ № С1 2 539 124 МПК	ОАО "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология" № 2 539 124	Устройство для измерения параметров диэлектриков при нагреве	Действует
	Патент РФ № С1 2 449 30 МПК	Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное предприятие "Алмаз" (ФГУП "НПП "Алмаз") № 2 449 300	Способ определения диэлектрической проницаемости материала	Действует

Продолжение таблицы А.1

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Методы измерений электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне	Патент РФ № С1 2 253 123 МПК	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ульяновский государственный технический университет" № 2 253 123	Способ измерения комплексной диэлектрической проницаемости низкоимпедансных материалов на свч и устройство для его осуществления	Действует
	Патент РФ № С2 2 631 014 МПК	Акционерное общество "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология" им. А.Г. Ромашина" № 2 631 014	Способ измерения параметров диэлектриков при нагреве и устройство для его осуществления	Действует
	Патент РФ № U1 90 911 МПК	Открытое акционерное общество "научно-исследовательский институт "феррит-домен" № 90 911	Устройство для измерения комплексной диэлектрической проницаемости тонкопленочных материалов на сверхвысоких частотах	Действует

Продолжение таблицы А.1

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного документа
1	2	3	4	5
Методы измерений электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне	Патент РФ № С2 2 547 222 МПК	Открытое акционерное общество "Обнинское научно-производственное предприятие "Технология" № 2 547 222	Широкополосное радиопоглощающее покрытие	Действует
	Patent US No. 6784768 МПК	Pance; Kristi Dhimiter (West Boston, MA), Channabasappa; Eswarappa (Acton, MA), Khalil; Adil (Lowell, MA) № 6784768	Method and apparatus for coupling energy to/from dielectric resonators	Действует

Таблица А.2 – Научно-техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год, место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Методы измерений электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне	1. Т. Nakamura, Y. Nikawa. Precise measurement of complex permittivity of materials for telecommunications devices		Journal of Telecommunications and Information Technology. 2011. V. 1, No 3. P. 66 – 70.
	2. V. V. Komarov, V. V. Yakovlev. Modeling control over determination of dielectric properties by the perturbation technique		Microwave and optical technology letters. 2003. V. 39, No 6. P. 443 – 446.
	3. Л. Д. Ложкин, А. А. Солдатов. Моделирование электрофизических параметров тонких образцов на основе объёмных резонаторов в среде проектирования Microwave Studio		Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12. С. 23 – 30.

Выводы патентного исследования

Цель магистерской диссертации – методами численного моделирования и экспериментального исследования оценить границы применимости ММВ при измерениях электромагнитных характеристик диэлектрических и магнитодиэлектрических материалов с большими потерями в прямоугольном резонаторе, в рамках этой цели проводились патентные исследования.

Задачи патентных исследований – изучить методы исследования электромагнитных характеристик материалов с большими потерями в СВЧ-диапазоне. Определить технический уровень по данному вопросу в РФ и ведущих зарубежных странах. Сформировать группы патентов – аналогов для дальнейшей оценки перспективности защиты результатов научных исследований.

Патентный поиск (с глубиной поиска в 16 лет) был проведен по странам: РФ, США. В процессе патентного поиска были использованы следующие источники:

а) Российская БД: Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС), <http://new.fips.ru/>;

б) Зарубежная БД: United states patent and Trademark Office, <https://www.uspto.gov/>.

Патентные исследования выполнены в соответствии с заданием, регламент поиска выполнен в полном объеме.

Заключение:

Проведенные патентные исследования подтверждают научную значимость и прикладную перспективность исследований в данной области.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка об использовании в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ

Декан радиофизического
факультета

Томского государственного
университета



А.Г. Коротаев

2019 г.

Справка

об использовании в учебном процессе методических указаний «Прямоугольный многомодовый сверхвысокочастотный резонатор»

Настоящая справка подтверждает, что методические указания «Прямоугольный многомодовый сверхвысокочастотный резонатор», модернизированные магистрантом А.С. Поливановой, внедрены в учебный процесс кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета Томского государственного университета.

Методические указания используются при проведении лабораторных работ по следующим дисциплинам:

Измерения на СВЧ (4 курс бакалавриата и специалитета),

Специальная лаборатория (4 курс бакалавриата),

Гетерогенные среды искусственного и природного происхождения (1 курс магистратуры).

Заведующий кафедрой радиоэлектроники,
профессор

Г.Е. Дунаевский

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации: 2019 ▼

Выберите коллекции

Все	Википедия	Российские журналы
Рефераты	Российские конференции	Энциклопедии
Авторефераты	Иностранные журналы	Англоязычная википедия
Иностранные конференции		
PubMed		

Анализировать

Обработан файл:

Диссертация Поливанова.doc.

Год публикации: 2019.

Оценка оригинальности документа - 90.55%

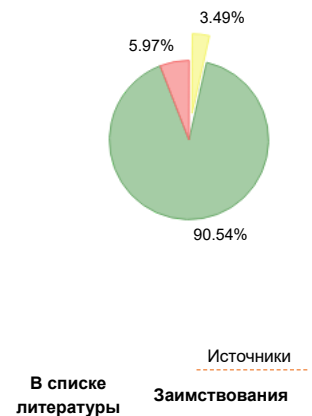
Процент условно корректных заимствований - 3.49%

Процент некорректных заимствований - 5.97%

Время выполнения: 40 с.

Документы из базы

Источники заимствования



В списке литературы

Источники
Заимствования

1. Анализ методов измерения электродинамических параметров материалов, поглощающих сверхвысокочастотное электромагнитное излучение (<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-izmereniya-elektrodinamicheskikh-parametrov-materialov-pogloschayuschih-sverhvysokochastotnoe-elektromagnitnoe>)

Авторы: Любченков А. В..

Год публикации: 2009. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-izmereniya-elektrodinamicheskikh-parametrov-materialov-pogloschayuschih-sverhvysokochastotnoe-elektromagnitnoe>
<http://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-izmereniya-elektrodinamicheskikh-parametrov-materialov-pogloschayuschih-sverhvysokochastotnoe-elektromagnitnoe>

Показать заимствования (14)



3.49%

2. Резонаторный метод измерения физических свойств жидкостей с применением полосковых линий
 (<http://cyberleninka.ru/article/n/rezonatornyy-metod-izmereniya-fizicheskikh-svoystv-zhidkostey-s-primeneniem-poloskovykh-liniy>)

Авторы: Совлуков Александр Сергеевич, Маслов Алексей Алексеевич, Яценко Виктория Владимировна, Власова Анастасия Ряхимжановна.

Год публикации: 2009. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/rezonatornyy-metod-izmereniya-fizicheskikh-svoystv-zhidkostey-s-primeneniem-poloskovykh-liniy> (<http://cyberleninka.ru/article/n/rezonatornyy-metod-izmereniya-fizicheskikh-svoystv-zhidkostey-s-primeneniem-poloskovykh-liniy>)

[Показать заимствования \(7\)](#)

2.15%

3. Курсовая работа: Резонатор на основе прямоугольного волновода
 (<http://www.bestreferat.ru/files/52/bestreferat-215652.docx>)

Год публикации: 2016. Тип публикации: реферат.

<http://www.bestreferat.ru/files/52/bestreferat-215652.docx>

(<http://www.bestreferat.ru/files/52/bestreferat-215652.docx>)

[Показать заимствования \(7\)](#)

1.35%

4. Измерение параметров диэлектриков с большими коэффициентами поглощения резонаторными методами в свч диапазоне
 (<http://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-parametrov-dielektrikov-s-bolshimi-koeffitsientami-pogloscheniya-rezonatornymi-metodami-v-svch-diapazone>)

Авторы: Панченко Александр Юрьевич.

Год публикации: 2001. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-parametrov-dielektrikov-s-bolshimi-koeffitsientami-pogloscheniya-rezonatornymi-metodami-v-svch-diapazone>

(<http://cyberleninka.ru/article/n/izmerenie-parametrov-dielektrikov-s-bolshimi-koeffitsientami-pogloscheniya-rezonatornymi-metodami-v-svch-diapazone>)

[Показать заимствования \(7\)](#)

1.29%

5. Моделирование диэлектрических характеристик композиционных материалов на основе метода асимптотического осреднения
 (<http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dielektricheskikh-harakteristik-kompozitsionnyh-materialov-na-osnove-metoda-asimptoticheskogo-osredneniya>)

Авторы: Димитриенко Ю. И., Соколов А. П., Маркевич М. Н..

Год публикации: 2013. Тип публикации: статья научного журнала.

<http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dielektricheskikh-harakteristik-kompozitsionnyh-materialov-na-osnove-metoda-asimptoticheskogo-osredneniya>

(<http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dielektricheskikh-harakteristik-kompozitsionnyh-materialov-na-osnove-metoda-asimptoticheskogo-osredneniya>)

[Показать заимствования \(5\)](#)

1.17%

[Дополнительно](#)

[Общеизвестные фрагменты](#)

[Значимые оригинальные фрагменты](#)

[Библиографические ссылки](#)

[Искать в Интернете](#)