

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники»

Объект авторского права

УДК 621.317.335.3

ТАНАНА
Ольга Валерьевна

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ
ПРОХОДНОГО ТИПА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛИН ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ
КОМПОНЕНТОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

Богущ Вадим Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, ректор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты

Савенко Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник 4 научно-исследовательского управления государственного учреждения «Научно-исследовательский институт Вооруженных Сил Республики Беларусь»

Козлов Сергей Вячеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится «01» февраля 2024 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375-17-293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «18» декабря 2023 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций

кандидат технических наук, доцент



Т.А. Пулко

ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем передачи данных, спутниковой связи, мониторинга в течение последних десятилетий в значительной мере связано с освоением сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, а именно, коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов радиоволн. Одним из важных аспектов освоения миллиметрового диапазона является разработка элементной базы. Она включает как широкодиапазонные волноводные структуры, так и частотно-селективные элементы, особое место среди которых занимают высокодобротные СВЧ-резонаторы. Они позволяют осуществить накопление энергии электромагнитного поля в некотором ограниченном объеме пространства, что дает возможность использовать их для стабилизации частоты генераторов, в качестве волномеров, фильтров, при измерении спектральных и флуктуационных характеристик сигналов. Другой важный аспект освоения данных диапазонов – создание новых типов материалов с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками. Особое место здесь занимают материалы на основе различных форм нанокремнезема (графен, материалы на основе фуллеренов и нанотрубок и т.д.).

В связи с этим весьма актуальным для миллиметрового диапазона длин волн является теоретическое и экспериментальное исследование конструкций, материалов и компонентов высокодобротных объемных и открытых резонаторов с улучшенными техническими характеристиками, а также разработка технологии их изготовления.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021 – 2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (пункт 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы»).

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих проектов и программ:

– Государственная комплексная программа научных исследований на 2006 – 2010 годы «ЭЛЕКТРОНИКА» «Развитие физических основ и разработка методов и аппаратуры для диагностики наноразмерных гетероструктур в СВЧ диапазоне» («Электроника 4.21»), № государственной регистрации 20062613;

– Государственная комплексная программа научных исследований на 2006 – 2010 годы «Наноматериалы и нанотехнологии» «Исследование электромагнитных характеристик нанокремнезёмных композитных материалов» («Нанотех 1.09»), № государственной регистрации 20062601;

– Договор № 4.1.4.1-173/09 «Разработать методику контроля электродинамических характеристик и исследовать отражающие свойства радиопоглощающих покрытий на основе углеродных наноматериалов», шифр «Нанотехнологии-СГ», № государственной регистрации 20093569;

– Договор № 1.3.1-181/10 «Разработать логистические наноструктурные СВЧ устройства на основе массивов углеродных нанотрубок», шифр «Нанотехнологии-СГ», № государственной регистрации 20100913;

– Научно-исследовательская работа «Разработка средств защиты информации от утечки по техническим каналам на основе углеродосодержащих материалов», № государственной регистрации 20210901;

– Научно-исследовательская работа «Разработка математической модели и методики измерения параметров радиопоглощающих наноструктурированных материалов в СВЧ диапазоне», № государственной регистрации 20211165.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является научное обоснование усовершенствованных методик расчета и конструкций высокочастотных широкодиапазонных резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов, оценка условий согласования таких резонаторов с волноводными линиями передач, разработка рекомендаций по практическому применению высокочастотных резонаторов в технических средствах и системах СВЧ-диапазона.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– проведено обоснование и разработаны широкодиапазонные высокочастотные цилиндрические и открытые квазиоптические резонаторы проходного типа;

– разработана методика электродинамического расчета элементов связи СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми прямоугольными волноводами;

– разработаны устройства широкополосного согласования таких резонаторов на основе полупрозрачной решетки и отрезка нерегулярного волновода;

– экспериментально подтверждена возможность практического использования широкодиапазонных высокочастотных цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа в СВЧ-системах различного назначения, а также для исследования электродинамических характеристик материалов в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц.

Объект исследования – СВЧ-резонатор с двумя элементами связи и элементом частотной перестройки.

Предмет исследования – методики электродинамического расчета, конструкции и экспериментальное исследование высокочастотных широкодиапазонных резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн.

Научная новизна

1. Предложены варианты конструкций широкодиапазонных высокочастотных резонаторов миллиметрового диапазона длин волн, основанные на использовании возбуждения нескольких однотипных высокочастотных колебаний H_{0mn} ($m \in [1; 2], m \in Z; n \in [2; 13], n \in Z$), что

позволило, переходя с одного типа колебаний на другой, расширить диапазон рабочих частот резонатора до 1/2 октавы. В разработанных цилиндрических и открытых квазиоптических проходных резонаторах предложено применение радиопоглощающего углеродосодержащего материала, на задней поверхности плунжера и внутренней поверхности задней торцевой стенки в объемных резонаторах, а также изготовление бокового корпуса открытого резонатора из колец такого же радиопоглощающего материала, позволившее повысить на 30% добротность в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц.

2. Разработана методика электродинамического расчета элементов связи СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми прямоугольными волноводами, учитывающая входные импедансы согласуемых элементов, которая позволяет определить величину волнового сопротивления устройств связи объемного резонатора с СВЧ-трактом по заданным величинам диапазона рабочих частот и полосы пропускания резонатора, рассчитать геометрические размеры элемента связи объемных резонаторов в рабочем диапазоне частот, что обеспечивает широкополосное согласование высокодобротных СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми волноводами в диапазоне частот не менее 1/2 октавы с КСВ < 1,7 без подрегулировки.

3. Предложены и реализованы элементы связи усовершенствованных высокодобротных резонаторов проходного типа в миллиметровом диапазоне длин волн, отличающиеся повышенной технологичностью и возможностью их использования для согласования резонаторов с СВЧ-трактом в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц с возможностью управления добротностью связи в пределах от 45 000 до 66 000 путем вариации конструктивных параметров.

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкции высокодобротных ($Q_n > 3 \cdot 10^4$) многомодовых цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц, отличающиеся использованием радиопоглощающего покрытия на основе порошкообразных углеродных наноматериалов, нанесенного на заднюю поверхность плунжера и внутреннюю поверхность задней торцевой стенки в объемных резонаторах, а также изготовлением бокового корпуса открытого резонатора из колец такого же радиопоглощающего материала, что обуславливает уменьшение обратного рассеяния электромагнитного излучения (до 50 дБ), обеспечивает устранение возникновения вырожденных колебаний в объемных резонаторах и исключает радиационные потери в открытых резонаторах.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование методики электродинамического расчета элементов связи высокодобротных широкодиапазонных резонаторов проходного типа в миллиметровом диапазоне длин волн с одномодовыми прямоугольными волноводами, основанной на градиентном методе вариации искомых параметров, для определения электрических характеристик устройств связи объемного резонатора с СВЧ-трактом по заданным величинам полосы пропускания резонатора, что позволило установить геометрические параметры устройства

связи, обеспечивающие широкополосное согласование высокодобротных СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми волноводами в диапазоне частот не менее 1/2 октавы с $K_{СВ} < 1,7$ без подрегулировки.

3. Конструкции элементов связи на основе полупрозрачной решетки либо отрезка плавнонерегулярного волновода для согласования высокодобротных широкодиапазонных резонаторов проходного типа с СВЧ-трактом, обеспечивающие значение добротности связи от 45 000 до 66 000 в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц, отличающиеся повышенной технологичностью и возможностью управления добротностью связи в широких пределах путем вариации конструктивных параметров, что позволяет использовать разработанные резонаторы в СВЧ-системах различного назначения.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. В совместно опубликованных работах автору принадлежат определение целей и постановка задач исследования, разработка комплекта измерительных резонаторов проходного типа для миллиметрового диапазона длин волн, разработка метода электродинамического расчета элементов связи резонаторов с СВЧ-трактом; проведение исследований электродинамических параметров композитных материалов, а также обработка, анализ и интерпретация полученных результатов, формулировка выводов.

Основными соавторами опубликованных работ являются доктор физико-математических наук Г.Я. Слепян, кандидат физико-математических наук В.Н. Родионова, кандидат физико-математических наук В.А. Карпович, научный руководитель, доктор физико-математических наук В.А. Богуш, которые принимали участие в определении целей и задач исследований, обсуждении методов исследований, интерпретации и обобщении полученных результатов.

Исследованные образцы композитных сред на основе наноглерода были синтезированы коллективом Главного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» в составе А.В. Крауклиса, И.Ф. Буякова, П.Г. Станового под руководством академика НАН Беларуси С.А. Жданка, коллективом Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в составе И.В. Комиссарова, С.Л. Прищепы, Е.Л. Прудниковой, О.А. Свергуна под руководством академика НАН Беларуси В.А. Лабунова и коллективом Белорусского государственного университета под руководством академика НАН Беларуси Ф.Ф. Комарова. Т.В. Гаевская руководила процессом нанесения гальванического покрытия на внутренние поверхности резонаторов и устройств связи на основе нерегулярных волноводов. В.Н. Скресанов, М.П. Натаров участвовали в выработке технических требований к экспериментальной установке на основе волноводно-лучевого тракта, а также предоставили его элементы для натурального эксперимента. Г.И. Вольнец, Н.В. Любецкий, А.А. Савук, И.А. Гринчук, А.В. Марковский участвовали в подготовке

исследуемых образцов и проведении экспериментальных исследований. С.А. Максименко, А.М. Немиленцев предоставили для экспериментальных исследований образцы Сибирского отделения РАН и американские образцы в рамках проекта НАТО «Наука ради мира и безопасности». Э.Г. Раков, И.В. Аношкин предоставили для экспериментальных исследований образцы РХТУ им. Д.И. Менделеева. Ю.П. Голубев участвовал в анализе и интерпретации экспериментальных данных резонаторов.

Научные выводы и положения, выносимые на защиту, принадлежат лично соискателю. Результаты, полученные соавторами публикаций, в представленную диссертационную работу не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: International Kharkov Symposium «Physics and engineering of millimeter and sub-millimeter waves» (Kharkov, 2007, 2010, 2020), Международный симпозиум «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2011, 2016, 2018), Signal Processing Symposium (Wilga, 2009), IV Международная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2009), II Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника, состояние и перспективы развития» (Харьков, 2005), Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке» (Минск, 2007, 2008, 2009), Вторая всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО2007» (Новосибирск, 2007), I международная научно-практическая конференция АПФЭЭ-2022 (Новополоцк, 2022), XXXI международная научно-практическая конференция «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 2023).

Использование результатов диссертации подтверждено актами их внедрения в производство и учебный процесс.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликовано 32 научные работы общим объемом 13,21 авторского листа. Из них 9 статей объемом 4,13 авторского листа – в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 8 статей – в других научных изданиях объемом 5,22 авторского листа, 11 статей – в сборниках материалов конференций объемом 3,62 авторского листа, 3 статьи опубликованы в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,24 авторского листа. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 1 приложения. Список использованных источников включает библиографический список из 98 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 32 наименований. Общий объем – 114 страниц, в том числе 60 рисунков на 45 страницах, 8 таблиц на 8 страницах, 1 приложение на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе представлен анализ современных подходов к созданию широкодиапазонных высокодобротных СВЧ резонаторов.

Информационный поиск по материалам ведущих отечественных и зарубежных источников показал, что наиболее многочисленным и перспективным классом высокодобротных резонаторов, используемых в миллиметровом диапазоне длин волн, являются открытые резонаторы.

Классические методы расчета резонаторов позволяют проводить вычисления только для одномодовых узкодиапазонных резонаторов. Однако, для выполнения многоцелевых исследований одномодовые узкодиапазонные резонаторы малоприменимы либо требуют наличия комплекта резонаторов. Применение объемных резонаторов позволяет получать резонансные системы с высокой добротностью, большим эквивалентным сопротивлением в диапазоне от дециметровых до миллиметровых волн. Кроме того, объемные резонаторы обладают рядом конструктивных достоинств: не нуждаются в экранировке, внешняя поверхность резонатора находится под нулевым потенциалом высокой частоты, высокая механическая и климатическая прочность. Основной трудностью, возникающей при проектировании СВЧ-резонаторов в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц, являются их малые геометрические размеры и резкое возрастание в них омических потерь.

Для согласования резонатора с СВЧ-трактом используются различные элементы связи. Выбор вида связи с резонатором определяется применением резонатора. Все известные устройства связи являются узкополосными. Размеры устройств связи обычно подбираются экспериментальным путем.

Анализируя результаты ранее выполненных теоретических и экспериментальных работ, можно сделать вывод, что существующие в коротковолновом диапазоне частот высокодобротные резонаторы узкодиапазонны и характеризуются невысоким значением нагруженной добротности. Поэтому важной задачей проектирования СВЧ резонаторов является обеспечение высокого значения нагруженной добротности, а также обеспечение широкого рабочего диапазона частот.

Во второй главе представлены результаты моделирования и разработки методики оценки элементов связи резонатора с СВЧ-трактом.

Одним из главных требований, предъявляемых резонатору, является высокая собственная добротность в сочетании с широким диапазоном перестройки частоты. Поэтому, весьма важной является проблема создания соответствующего элемента связи этого резонатора с СВЧ-трактом.

Элемент связи промоделирован четырехполосником, включенным между резонатором и линией передачи, и представлен полной канонической схемой замещения Felsen-Oliver для четырехполосников с потерями. Для определения минимума среднестатистического отклонения исходных данных от функции аппроксимации использован градиентный метод вариации искомых параметров. Моделирование выполнялось с помощью пакета «CST Microwave Studio» при помощи подпрограммы расчета в частотной

области (Frequency domain solver, F!), которая используется для решения широкополосных задач.

На рисунке 1 дано схематическое изображение резонатора (а) с отверстием связи и его эквивалентная схема (б) в виде двух связанных линий. Первая линия (отверстие связи) имеет электродинамическое и электростатическое волновые сопротивления, равные соответственно \tilde{p}_{11} и $\tilde{\omega}_{11}$, вторая – \tilde{p}_{22} и $\tilde{\omega}_{22}$. Обе линии связаны между собой на участке электрической длиной \mathcal{G} , при этом сопротивления связи равны \tilde{p}_{12} и $\tilde{\omega}_{12}$. Импеданс $Z_2 = R_2 - j\tilde{p}_{22}\text{ctg}\mathcal{G}$ включает в себя реактивное сопротивление части резонатора длиной \mathcal{G}_2 и собственные потери всего резонатора, пересчитанные в плоскость присоединения Z_2 .

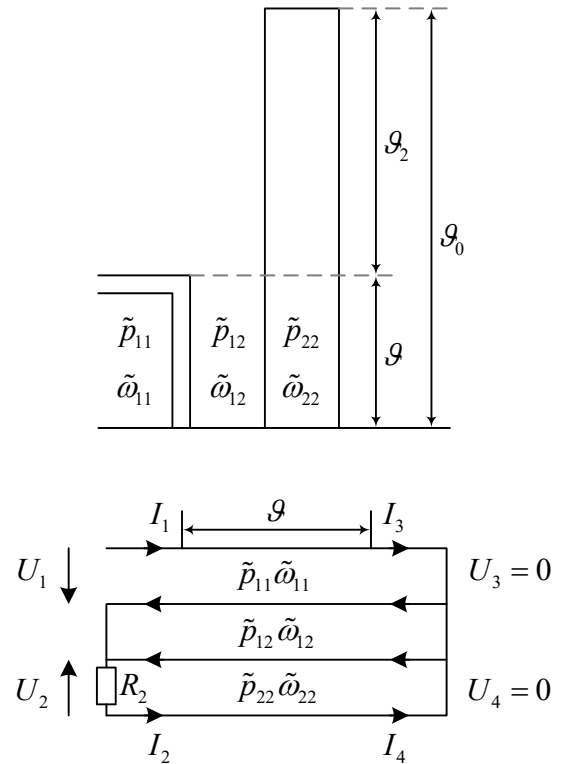
Двухполюсник (рисунок 1, б) является производным от восьмиполюсника, образованного двумя связанными линиями с неравными волновыми сопротивлениями. Матрица передачи такого восьмиполюсника имеет вид

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \mathcal{G} & 0 & j\tilde{p}_{11} \sin \mathcal{G} & j\tilde{p}_{12} \sin \mathcal{G} \\ 0 & \cos \mathcal{G} & j\tilde{p}_{12} \sin \mathcal{G} & j\tilde{p}_{22} \sin \mathcal{G} \\ j\frac{\sin \mathcal{G}}{\tilde{\omega}_{11}} & -j\frac{\sin \mathcal{G}}{\tilde{\omega}_{12}} & \cos \mathcal{G} & 0 \\ -j\frac{\sin \mathcal{G}}{\tilde{\omega}_{12}} & j\frac{\sin \mathcal{G}}{\tilde{\omega}_{22}} & 0 & \cos \mathcal{G} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Так как $U_3 - U_1 = 0$, а $U_2 = -I_2 Z_2$, входной импеданс двухполюсника (резонатора с отверстием связи) запишется

$$Z_{\text{ex}} = j\tilde{p}_{11} \text{tg} \mathcal{G} + \tilde{p}_{12}^2 \text{tg}^2 \mathcal{G} \frac{R_2 + j\tilde{p}_{22} \mathcal{G}}{R_2^2 + \tilde{p}_{22}^2 \mathcal{G}}, \quad (2)$$

где R_2 – собственные потери резонатора, отнесенные к плоскости, отстоящей от плоскости короткого замыкания на угол \mathcal{G} .



а – схематическое изображение;
б – эквивалентная схема
Рисунок 1 – Схематическое изображение резонатора с отверстием связи

Нагруженная добротность резонатора

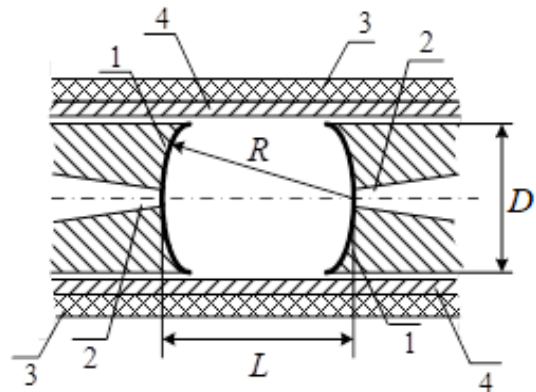
$$Q_n \approx (2n-1) \frac{\pi p_{11}^2 \operatorname{tg}^2 \vartheta + 1}{2 p_{11} p_{c\vartheta}^2 \sin^2 \vartheta}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что $Q_n = f/2\Delta f$, где f – резонансная частота, $2\Delta f$ – ширина полосы пропускания нагруженного резонатора, и $\vartheta = 2\pi fl/c$, где l – длина участка связи, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, найдено выражение для полосы пропускания резонатора

$$2\Delta f = a\varphi(\vartheta), \quad (4)$$

где $a = \frac{cp_{11}p_{c\vartheta}^2}{(2n-1)\pi^2 l}$, $\varphi(\vartheta) = \frac{\vartheta \sin^2 \vartheta}{p_{11}^2 \operatorname{tg}^2 \vartheta + 1}$.

Предложен элемент связи высокодобротного открытого резонатора с одномодовым прямоугольным волноводом на основе отрезка плавнонерегулярного волновода, разработан численный метод расчета указанного элемента связи на основе неполного метода Галеркина с полуобращением в граничных условиях. Данная методика впервые применена в элементах связи на основе отрезка нерегулярного волновода в резонаторах проходного типа миллиметрового диапазона длин волн, что позволило реализовать широкополосное согласование высокодобротных цилиндрических и открытых квазиоптических СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми волноводами в диапазоне частот не менее 1/2 октавы с КСВ < 1,7. На рисунке 2 представлено схематическое изображение широкодиапазонного высокодобротного открытого квазиоптического резонатора проходного типа с элементом связи на основе плавнонерегулярного волновода.



1 – зеркала резонатора, 2 – устройство связи, 3 – корпус,

4 – радиопоглощающий материал из углеродного наноматериала

Рисунок 2 – Схематическое изображение широкодиапазонного высокодобротного открытого квазиоптического резонатора проходного типа с элементом связи на основе плавнонерегулярного волновода

Разработан приближенный аналитический метод расчета элемента связи высокодобротного резонатора на основе полупрозрачной решетки с одномодовым прямоугольным волноводом. Доказано, что наличие на поверхности решетки границы раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями не изменяет

граничных условий, а приводит только к изменению амплитуды волн, возбуждаемых элементом связи за счет эффектов парциального отражения от двух границ подложки. Полученное выражение для добротности связи резонатора как функции размеров щелей, числа щелей и диэлектрической проницаемости подложки, позволило определить в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц максимально возможную добротность элемента связи, которая составила 55 000...65 000.

В третьей главе представлены методики расчета и параметры усовершенствованных конструкций и технологий широкодиапазонных высокодобротных резонаторов.

Для расширения диапазона рабочих частот были рассчитаны, спроектированы и экспериментально исследованы многомодовые цилиндрические (рисунок 3) и открытые квазиоптические (рисунок 4) резонаторы проходного типа, работающие на нескольких однотипных высокодобротных колебаниях H_{0mn} ($m \in [1; 2], m \in Z; n \in [2; 13], n \in Z$).



Рисунок 3 – Высокодобротные широкодиапазонные цилиндрические резонаторы проходного типа в диапазоне частот 37,50...53,57 ГГц и 53,57...78,33 ГГц

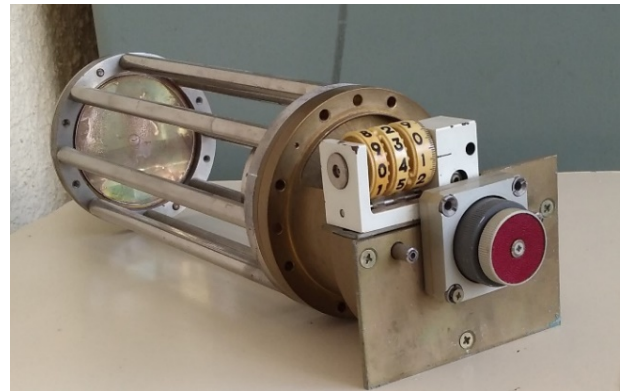


Рисунок 4 – Широкодиапазонный высокодобротный открытый квазиоптический резонатор проходного типа в диапазоне частот 25,95...37,50 ГГц

Расчет размеров цилиндрических резонаторов проводился по спектру собственных мод, определяемому соотношением

$$\left(f_p D\right)^2 = \left(c \frac{x_{lm}}{\pi}\right)^2 + \left(c \frac{n}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{L}\right)^2, \quad (5)$$

где f_p – резонансная частота, ГГц; c – скорость света, м/с; D и L – диаметр и длина резонатора, мм; x_{lm} – значение корней бесселевых функций для E -колебаний или их производных для H -колебаний; n – число полуволн, укладываемых вдоль оси резонатора.

Приведенная формула традиционно используется для расчета геометрических размеров резонатора на одну фиксированную резонансную частоту и на определенном типе колебаний. Но, используя данную формулу,

можно рассчитать возможность возбуждения в качестве рабочих нескольких однотипных колебаний, что позволит, переходя с одного типа на другой, расширить диапазон рабочих частот резонатора.

Геометрические размеры резонаторов, соответствующих диапазонов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические размеры высокочастотных широкодиапазонных цилиндрических резонаторов проходного типа

Диапазон частот, ГГц	Максимальное L_{\max} и минимальное L_{\min} внутреннее расстояние от торцевой поверхности плунжера до внутренней поверхности торцевой стенки, мм	Внутренний диаметр резонатора $D_{\text{внутр}}$, мм
25,95...37,5	36...11	14,5
37,5...53,57	22...14	12,4
53,57...78,33	20...2	10,7

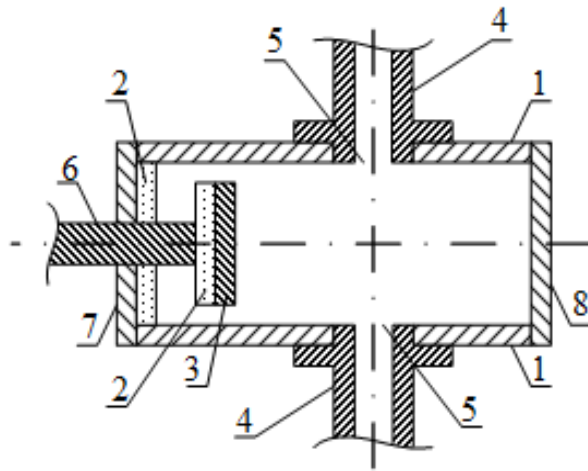
В таблице 2 приведены основные параметры разработанных широкодиапазонных высокочастотных цилиндрических резонаторов проходного типа.

Таблица 2 – Основные параметры широкодиапазонных высокочастотных цилиндрических резонаторов проходного типа

Диапазон, ГГц	Добротность нагруженная, не менее	КСВН _{вх1}	КСВН _{вх2}
25,95...37,5	38000	1,60	1,43
37,5...53,57	41000	1,65	1,55
53,57...78,33	44000	1,70	1,52

Одной из основных задач, стоящих при проектировании резонаторов, является обеспечение высокого значения собственной добротности широкодиапазонного СВЧ-резонатора. Для этого в качестве рабочих типов колебаний выбирались колебания типа H_{0mn} . Данный тип колебаний не имеет аксиальной составляющей, поэтому в конструкции резонатора для обеспечения его частотной перестройки используется бесконтактный плунжер. Зазор между внутренней поверхностью резонатора и плунжером является источником проникновения мешающих колебаний в заплунжерное пространство, что приводит к снижению собственной добротности резонатора и возникновению возбуждения паразитных колебаний в заплунжерном пространстве. Для подавления этих колебаний в данных резонаторах впервые применялись радиопоглощающие покрытия, изготовленные из порошков углеродных наноматериалов. Используемый радиопоглощающий материал характеризуется значениями ослабления электромагнитного излучения в рабочем диапазоне частот широкодиапазонного высокочастотного СВЧ-резонатора, составляющими не менее 40 дБ. Данный материал нанесен на заднюю поверхность плунжера, а также на внутреннюю поверхность задней торцевой стенки, что обуславливает уменьшение обратного рассеяния электромагнитного излучения в широкодиапазонном

высокодобротного СВЧ-резонаторе (рисунок 5). Высокое значение собственной добротности широкодиапазонного высокодобротного СВЧ-резонатора обусловлено тем, что данный резонатор является многомодовым.



1 – корпус, 2 – радиопоглощающий материал из УНМ, 3 – плунжер, 4 – волноводы, 5 – отверстия связи, 6 – приводно-отсчетный механизм, 7 – задняя торцевая стенка, 8 – передняя торцевая стенка

Рисунок 5 – Схематическое изображение широкодиапазонного высокодобротного цилиндрического СВЧ-резонатора проходного типа

В таблице 3 приведены сравнительные экспериментальные данные цилиндрических резонаторов с ранее применявшимся поглощающим материалом ПМ-3 (ОСТ 4Г0.054.10) и вновь примененным радиопоглощающим материалом на основе углеродных наноматериалов (РПМ УНМ).

Таблица 3 – Сравнительные экспериментальные данные нагруженной добротности цилиндрических резонаторов

Диапазон, ГГц	Добротность нагруженная, не менее (РПМ УНМ)	Добротность нагруженная, не менее (ПМ-3)
25,95...37,5	38 000	29 000
37,5...53,57	41 000	32 000
53,57...78,33	44 000	34 000

Разработанные многомодовые открытые квазиоптические резонаторы образованы двумя сферическими конфокальными зеркалами, в которых поля существуют в виде квазиоптических волновых пучков, характеризующихся соотношениями между продольной и поперечной по отношению к оси симметрии компонентами волнового вектора. В этом случае спектр разрежен по поперечным индексам и собственные частоты определяются выражением:

$$\omega_{mnq} = \frac{\pi c q}{L} \left(1 + \mu_{mn}^2 \frac{\lambda^2}{8\pi^2 a^2 q} \right), \quad (6)$$

где L – расстояние между зеркалами, мм; m и n – поперечные индексы моды; q – продольный индекс моды, $q \gg m, n$; a – радиус зеркал, мм; μ – корни бесселевых функций.

Геометрические размеры разработанных открытых квазиоптических резонаторов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Геометрические размеры разработанных открытых квазиоптических резонаторов

Диапазон частот, ГГц	Диаметр зеркала, мм	Радиус кривизны, мм	Максимальное расстояние между зеркалами L_{max} , мм	Минимальное расстояние между зеркалами L_{min} , мм	Ход приводного механизма, мм
25,95...37,5	118	270	245	205	40
37,5...53,57	94	240	229	199	30
53,57...78,33	76	220	211	181	30

Для повышения добротности в открытых резонаторах также впервые был применен такой же радиопоглощающий материал на основе порошкообразных углеродных наноматериалов. Основным источником потерь в открытых резонаторах являются радиационные потери. Для устранения радиационных потерь в открытых резонаторах и для повышения добротности применен внешний кожух – корпус, изготовленный из наборных колец радиопоглощающего материала (рисунок 6).

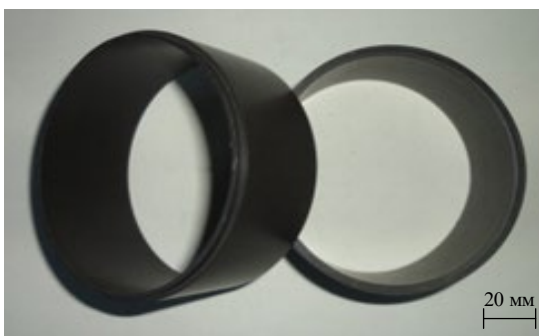


Рисунок 6 – Кольца из радиопоглощающего материала для открытого резонатора диапазона 37,5...53,57 ГГц

В таблице 5 приведены сравнительные экспериментальные данные нагруженной добротности открытых квазиоптических резонаторов с ранее применявшимся в открытых резонаторах поглощающим материалом ПМ-3 (ОСТ 4Г0.054.10) и вновь примененным радиопоглощающим материалом на основе углеродных наноматериалов (РМП УНМ).

Таблица 5 – Сравнительные экспериментальные данные нагруженной добротности открытых квазиоптических резонаторов

Диапазон, ГГц	Добротность нагруженная, не менее (РМП УНМ)	Добротность нагруженная, не менее (ПМ-3)
25,95...37,5	48 000	35 000
37,5...53,57	57 000	42 000
53,57...78,33	66 000	51 000

Параметром, характеризующим оптимальное согласование резонатора с СВЧ-трактом, является величина коэффициента стоячей волны (КСВ). Измерение КСВ производилось для устройства связи открытого резонатора на основе полупрозрачной решетки, рассчитанной по методике, описанной во второй главе. Кроме измерения КСВ экспериментально исследовался также и один из важнейших параметров – добротность резонатора. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты экспериментальных исследований открытых резонаторов с элементом связи на основе полупрозрачной решетки

Частотный диапазон, ГГц	Сечение волновода, мм	Добротность нагруженная, не менее	КСВ _{вх1} , не более	КСВ _{вх2} , не более
25,95...37,5	7,2 × 3,4	56 000	1,6	1,6
37,5...53,57	5,2 × 2,6	60 000	1,6	1,6
53,57...78,33	3,6 × 1,8	65 000	1,65	1,65

Применение решетки позволило разработать широкодиапазонный открытый резонатор, перекрывающий стандартный частотный диапазон и оптимально согласованный с линией передачи в этом диапазоне.

На основании методики, описанной во второй главе, предложены элементы связи открытых резонаторов с СВЧ-трактом на основе отрезка плавнорегулярного волновода. Элемент связи расположен в центре зеркала и представляет собой узкую щель размером $2a_1 \times b$ ($2a_1 \ll b$) (рисунок 7).

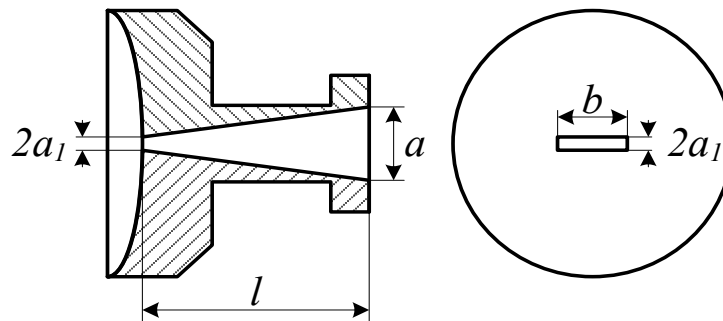


Рисунок 7 – Схематическое изображение элемента связи открытого резонатора на основе плавнорегулярного волноводного перехода

В таблице 7 приведены оптимальные размеры плавнорегулярных волноводных переходов, обеспечивающие максимальную добротность связи.

Таблица 7 – Размеры плавнорегулярных волноводных переходов

Частотный диапазон, ГГц	25,95...37,5	37,5...53,57	53,57...78,33
Сечение возбуждающего волновода, $b \times a$, мм	7,2 × 3,4	5,2 × 2,6	3,6 × 1,8
Сечение щели на зеркале, $b \times 2a_1$, мм	7,2 × 0,4	5,2 × 0,36	3,6 × 0,28

Экспериментальное исследование высокодобротных широкодиапазонных резонаторов проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц с разработанными элементами связи показали, что они характеризуются высокими значениями добротности связи $Q_{св} = 45\ 000...66\ 000$ и нагруженной добротности $Q_n = 45\ 000...75\ 000$ (при $KCB = 1,6...1,7$), что позволяет использовать их в СВЧ-системах различного назначения, а также для измерения характеристик материалов с различными геометрическими параметрами.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования и перспективы использования разработанных конструкций СВЧ-резонаторов в системах передачи и обработки информации, и накопления энергии.

Разработан метод измерения электродинамических параметров углеродосодержащих материалов в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц для определения комплексной диэлектрической проницаемости материала по измеряемым параметрам резонатора проходного типа, таким как резонансная частота, добротность, коэффициенты отражения в обе стороны.

Предложены варианты практического применения высокодобротных объемных и открытых резонаторов проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц в современной радиотехнике для частотной фильтрации электромагнитных колебаний, реализации обратной связи при их усилении и генерации, при измерении характеристик материальных сред, для создания промышленных установок и оборудования, в основе которых лежит принцип накопления электромагнитной энергии в резонансном объеме.

Основным итогом диссертационной работы является решение актуальной задачи, заключающейся в разработке новых малогабаритных широкодиапазонных высокодобротных СВЧ-резонаторов для миллиметрового диапазона длин волн различного функционального назначения с улучшенными электрическими параметрами и характеристиками. Особенностью работы является её прикладная направленность, позволяющая использовать полученные теоретические и экспериментальные результаты для решения научно-практических задач.

В Приложении А представлены копии актов о практическом использовании результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые разработан комплект высокодобротных ($Q_n > 3 \cdot 10^4$) широкодиапазонных цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц по спектру собственных мод, работающих на нескольких однотипных высокодобротных колебаниях H_{0mn} ($m \in [1; 2], m \in Z; n \in [2; 13], n \in Z$) с подавлением на 40 дБ мешающих и вырожденных типов колебаний и согласованных со стандартными волноводами с $KCB < 1,7$ во всем рабочем

диапазоне перестройки, достигнутым за счет использования в указанных конструкциях резонаторов радиопоглощающих материалов из порошков углеродных нанотрубок [4–А; 12–А; 14–А; 21–А; 22–А; 25–А; 32–А].

2. Выполнено моделирование и разработаны широкодиапазонные элементы связи резонаторов проходного типа с СВЧ-трактом. Разработан метод электродинамического расчета элементов связи СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми прямоугольными волноводами для определения величины волнового сопротивления элементов связи объемного резонатора с СВЧ-трактом по заданным величинам диапазона рабочих частот и полосы пропускания резонатора, а также для расчета геометрических размеров элемента связи объемных резонаторов в рабочем диапазоне частот. Разработан приближенный аналитический метод расчета элемента связи высокочастотного резонатора на основе полупрозрачной решетки с одномодовым прямоугольным волноводом. Получено выражение для добротности связи резонатора как функции размеров щелей, числа щелей и диэлектрической проницаемости подложки. Предложен элемент связи высокочастотного открытого резонатора с одномодовым прямоугольным волноводом на основе отрезка нерегулярного волновода, разработан численный метод расчета указанного элемента связи на основе неполного метода Галеркина с полуобращением в граничных условиях и применением к моделированию элементов связи на основе плавнонерегулярных волноводных переходов [1–А; 2–А; 8–А; 10–А; 11–А; 12–А; 25–А].

3. На основе разработанной методики электродинамических расчетов определены оптимальные размеры высокочастотных элементов связи проходных широкодиапазонных высокочастотных резонаторов в диапазонах 25,95...37,5 ГГц; 37,5...53,57 ГГц; 53,57...78,33 ГГц. Экспериментально исследованы элементы связи высокочастотных проходных широкодиапазонных резонаторов в диапазонах частот 25,95...37,5 ГГц; 37,5...53,57 ГГц; 53,57...78,33 ГГц и показано, что они характеризуются высокими значениями добротности связи $Q_{св} = 45\ 000...66\ 000$ (при КСВ = 1,6...1,7), что позволяет создать усовершенствованные высокочастотные и широкодиапазонные средства радиоизмерений на основе высокочастотных широкодиапазонных резонаторов проходного типа для контроля, диагностики различных материалов на основе нанокремнезема [1–А; 2–А; 6–А; 8–А; 10–А – 12–А; 15–А; 21–А; 22–А; 25–А; 30–А].

4. Разработан и экспериментально апробирован метод измерения электродинамических параметров материалов на основе нанокремнезема в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц с погрешностью измерений не более 2,5% во всем рабочем диапазоне частот для определения комплексной диэлектрической проницаемости материала по измеряемым параметрам резонатора проходного типа, таким как резонансная частота, добротность, коэффициенты отражения в обе стороны. Выполнены измерения электродинамических характеристик композитных материалов на основе нанокремнезема и установлены зависимости коэффициентов отражения и ослабления от их состава в частотном диапазоне 25,95...78,33 ГГц [3–А; 5–А; 7–А; 9–А; 13–А; 15–А – 20–А; 23–А; 24–А; 26–А – 29–А; 31–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные в данной диссертационной работе методы повышения добротности резонаторов, повышения развязки волноводных переключателей с применением в качестве поглотителей высокочастотной энергии на основе углеродных наноматериалов были внедрены в серийно выпускаемые в Беларуси изделия ИФ-40СА (см. Приложение А).

Широкодиапазонные высокодобротные цилиндрические и открытые квазиоптические резонаторы проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц могут применяться в современной радиотехнике для частотной фильтрации электромагнитных колебаний, реализации обратной связи при их усилении и генерации, при измерении характеристик материальных сред, для создания промышленных установок и оборудования, в основе которых лежит принцип накопления электромагнитной энергии в резонансном объеме.

Метод определения комплексной диэлектрической проницаемости материала по измеряемым параметрам резонатора проходного типа является базой для создания аппаратуры измерения электродинамических параметров материалов, что имеет прикладное значение для исследований композитных материалов на основе наноглерода.

Набор рассчитанных, спроектированных и экспериментально исследованных резонаторов использован для реализации трех измерительных стендов материальных параметров композитных сред в стандартных частотных диапазонах 25,95...37,5 ГГц; 37,5...53,57 ГГц; 53,57...78,33 ГГц с погрешностью измерений не более 2,5%. Указанные стенды используются при исследовании параметров новых типов искусственных композитных сред в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Решётчатые элементы связи высокочастотных резонаторов и прямоугольных волноводов в миллиметровом диапазоне / В.А. Карпович, Г.Я. Слепьян, В.Н. Скрасанов, В.Н. Родионова, О.В. Филипёнок (Танана) // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 11. – С. 1303–1308.

2–А. Элементы связи высокочастотных резонаторов с одномодовыми волноводами на основе нерегулярного волновода / Г.Я. Слепьян, В.Н. Скрасанов, В.Н. Родионова, В.А. Карпович, М.П. Натаров, О.В. Филипёнок (Танана) // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 2. – С. 198–203.

3–А. Радиопоглощающие свойства углеродных наноматериалов / С.А. Жданок, А.В. Крауклис, И.Ф. Буяков, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, О.В. Танана // Нанотехника. – 2011. – № 2. – С. 72–75.

4–А. Комплект измерительных СВЧ резонаторов / В.Н. Родионова, В.А. Карпович, О.В. Танана, Т.В. Гаевская // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 3. – С. 1–6.

5–А. Танана О.В., Карпович В.А., Слепьян Г.Я. Метод определения комплексной диэлектрической проницаемости композитных наноматериалов по электродинамическим параметрам СВЧ резонаторов // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 2. – С. 28–31.

6–А. Танана О.В. Методы и стендовая аппаратура для измерения электрофизических характеристик наноструктурных углеродных материалов в СВЧ диапазоне // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2016. – № 4. – С. 97–102.

7–А. Танана О.В. Наноструктурные углеродные материалы для практических приложений в СВЧ диапазоне // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2019. – № 4. – С. 84–90.

8–А. Богуш В.А., Родионова В.Н., Танана О.В. Моделирование параметров устройства связи измерительного резонатора с СВЧ-трактом // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2022. – № 4. – С. 43–48.

9–А. Богуш В.А., Родионова В.Н., Танана О.В. Электродинамические характеристики объемного радиопоглощающего материала на основе наноуглерода // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2022. – № 11. – С. 47–52.

Статьи в других научных изданиях

10–А. Grating coupling elements for high-Q resonators and rectangular waveguides of the millimeter wave band / V. Karpovich, G. Slepyan, V. Skresanov, V. Rodionova, O. Filipenok (Танана) // Journal of Communications Technology and electronics. – 2006. – Vol. 12. – P. 1227–1231.

11–А. Irregular-Waveguide elements coupling high-Q resonators with single-mode waveguides / G.Ya. Slepyan, V.N. Skresanov, V.N. Rodionova, V.A. Karpovich,

M.P. Natarov, O.V. Filipenok (Танана) // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2008. – Vol. 53, No. 2. – P. 184–189.

12–А. Электродинамика специальных высокочастотных резонансных систем и микроволновые технологии / Г.Я. Слепьян, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, Г.И. Вольнец, А.А. Савук, О.В. Танана, И.А. Гринчук // *Фундаментальные и прикладные физические исследования 2002 – 2009 гг.: сб. тр. / Белор. гос. ун-т. Ин-т ядерных проблем; под ред. проф. В.Г. Барышевского. – Минск: БГУ, 2009. – С. 291–321.*

13–А. Электромагнитные характеристики наноуглеродных композитных материалов в СВЧ диапазоне / В.А. Лабунов, Ф.Ф. Комаров, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, И.В. Комиссаров, В.Б. Карпович, П.Г. Становой, О.В. Танана, А.В. Марковский // *Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск: Изд. центр БГУ, 2011. – С. 14–22.*

14–А. A Set of Measuring Microwave Resonators / V.A. Karpovich, T.V. Gaevskaya, V.N. Rodionova, O.V. Tanana // *Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – Vol. 56, No. 3. – P. 289–293.*

15–А. Характеризация наноструктурных материалов по электродинамическим параметрам (методики, аппаратура, результаты) / В.А. Карпович, В.А. Лабунов, С.А. Жданок, В.Б. Оджаев, Т.В. Гаевская, Ф.Ф. Комаров, Н.В. Любецкий, С.С. Грабчиков, Л.А. Близнюк, В.Н. Родионова, А.В. Крауклис, О.В. Танана, П.Г. Становой, О.А. Свергун // *Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010 – 2016 гг.: сб. тр. / Белор. гос. ун-т. Ин-т ядерных проблем; под ред. проф. В.Г. Барышевского. – Минск: Изд. центр БГУ, 2016. – С. 348–364.*

16–А. Радиопоглощающие покрытия с использованием наноструктурированного углерода / В.А. Карпович, И.В. Комиссаров, В.А. Лабунов, Н.В. Любецкий, В.Н. Родионова, О.А. Свергун, О.В. Танана // *Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. ст. / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2016. – С. 320–329.*

17–А. Экспериментальные образцы датчиков и устройств поглощения электромагнитной энергии в СВЧ диапазоне на основе массивов МФУНТ / В.А. Лабунов, С.Л. Прищепа, Н.В. Любецкий, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, И.В. Комиссаров, Г.И. Вольнец, О.В. Танана // *Наноструктуры в конденсированных средах: сб. научн. ст. / Нац. акад. наук Беларуси. Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова. – Минск, 2018. – С. 3–10.*

Статьи в сборниках материалов научных конференций

18–А. Исследование композитных материалов в миллиметровом диапазоне / С.А. Максименко, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, Г.Я. Слепьян, В.Н. Скрасанов, О.В. Филипёнок (Танана), И.А. Гринчук // *Прикладная радиоэлектроника, состояние и перспективы развития: II Междунар. радиоэлектр. форум, 19–23 сентября 2005 г. / ХНУРЭ. – Харьков, 2005. – С. V78 – V81.*

19–А. Филипёнок (Танана) О.В., Немиленцев А.М. Измерение поглощающих характеристик наноразмерных композитов для радиоволн

миллиметрового диапазона // Современные проблемы физики: сб. науч. тр. конф., 21-23 июня 2006 г. – Минск, 2006. – С. 188–192.

20–А. Electromagnetic wave absorption and reflection by carbon nanotube composites / V. Karpovich, V. Rodionova, A. Rakov, I. Anoshkin, O. Philipenok (Танана) // The sixth international Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves and workshop on terahertz technologies, Symposium Proceedings, V. 2, Kharkov, Ukraine, June 25-30. Edited by A. Kostenko, A. Usikov. Institute of Radio-Physics and Electronics of NAS of Ukraine. – Kharkov, 2007. – P. 825–827.

21–А. Карпович В.А., Слепян Г.Я., Филипёнок (Танана) О.В. Резонансные методы для материаловедения // Молодежь в науке – 2008: сб. науч. тр. междунар. конф. молодых ученых, 17–20 июня 2008 г. – Минск, 2008. – С. 158–162.

22–А. High Q-factor wideband resonators for millimeter and submillimeter radars: physical principles, theory and experiment / V.N. Rodionova, G.Ya. Slepian, V.A. Karpovich, O.V. Tanana // Signal Processing Symposium (SPS 2009), Poland, 28–30 May 2009. – Wilga, 2009. – P. 221–224.

23–А. Карпович В.А., Родионова В.Н., Танана О.В. Сложные поляризаионные явления в углеродных наноматериалах в сверхвысокочастотном диапазоне // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. междунар. науч. конф. ФТТ-2009, Минск, 20–23 октября 2009 г.: в 3 т. / редкол.: Н.М. Олехнович (пред.). – Минск: Издат.Вараксин А.Н., 2009. – Т. 3. – С. 245–247.

24–А. Measurements of electromagnetic properties of magnetically functionalized multi-wall carbon nanotubes / V. Labunov, E. Prudnikova, V. Karpovich, V. Rodionova, O. Tanana // 2010 International Kharkov Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves, Kharkov, Ukraine, June 21–26. – Kharkov, 2010. – P. 978–980.

25–А. Родионова В.Н., Карпович В.А., Танана О.В. Резонансные системы сверхвысокочастотного диапазона // РТПСАС'2012: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Киев, 22–29 февр. 2012 г. / Нац. техн. ун-т Украины «Киевский политехнический институт». – Киев, 2012. – С. 117–118.

26–А. Tanana O.V., Golubev Yu.P. Physical research of carbon nanomaterials in the microwave range // 2020 IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, Ukraine, September 21–25. – Kharkov, 2020. – P. 531–534.

27–А. Богуш В.А., Родионова В.Н., Танана О.В. Радиопоглощающие материалы для практических приложений в СВЧ диапазоне // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электрон. сб. ст. I междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2023. – С. 18–22.

28–А. Танана О.В., Богуш В.А. Методика измерения электродинамических характеристик композиционных материалов [Электронный ресурс] // Физика конденсированного состояния: материалы XXXI междунар. науч.-практ.

конф. аспирантов, магистров и студентов (Гродно), 13–14 апр. 2023 г. / ГрГУ им. Янки Купалы; редкол.: Г.А. Гачко (гл. ред.). – Гродно: ГрГУ, 2023. – С. 342–344.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

29–А. Отражение и поглощение электромагнитных волн углеродными нанотрубками и нановолокнами / Э.Г. Раков, В.А. Карпович, В.Н. Родионова, И.В. Аношкин, О.В. Филипёнок (Танана) // НАНО2007: Вторая Всеросс. конф. по наноматериалам: тез. докл., 13–16 марта 2007 г. – Новосибирск, 2007. – С. 483.

30–А. Филипёнок (Танана) О.В. Стенд для измерения электрофизических характеристик наноматериалов в СВЧ диапазоне // XI Междунар. молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», Харьков, 10–12 апр. 2007, ХНУРЭ. – Харьков, 2007. – Ч. 1. – С. 189.

31–А. Танана (Филипёнок) О.В., Карпович В.А., Слепян Г.Я. Высокочастотные свойства нанокompозитных материалов // XIII Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», 30 марта – 01 апр. 2009 г., ХНУРЭ. – Харьков, 2009. – Ч. 1. – С. 306.

Патенты

32–А. Широкодиапазонный высокочастотный СВЧ-резонатор: полез. модель № 13002 / В. А. Богуш, О. В. Бойправ, О. В. Танана. – Опубл. 01.08.2022.



РЭЗІЮМЭ

Танана Вольга Валер'еўна

Шырокадыяпазонныя высокадабротныя рэзанатары прахаднога тыпу міліметравага дыяпазону даўжынь хваль з выкарыстаннем вугляродазмяшчальных кампанентаў

Ключавыя словы: высокадабротныя шырокадыяпазонныя рэзанатары прахаднога тыпу, цыліндрычны рэзанатар, адкрыты рэзанатар, міліметровыя хвалі, элементы сувязі, вугляродазмяшчальныя радыёпаглынальныя матэрыялы.

Мэта працы: навуковае абгрунтаванне ўдасканаленых метадык разліку і канструкцый высокадабротных шырокадыяпазонных рэзанатараў прахаднога тыпу міліметравага дыяпазону даўжынь хваль з выкарыстаннем вугляродазмяшчальных кампанентаў, ацэнка ўмоў узгаднення такіх рэзанатараў з хваляводнымі лініямі перадач, распрацоўка рэкамендацый па практычным ужыванні высокадабротных рэзанатараў.

Метады даследавання: аналітычныя і лікавыя метады электрадынамічнага мадэлявання, звышвысокашчынных вымярэнні дабротнасці, каэфіцыента стаялай хвалі, каэфіцыента адлюстравання і велічыні паслаблення.

Выкарастаная апаратура: вектарны аналізатар ланцугоў Anritsu MS4644B, вымяральнік КСВН і паслабленняў панарамны P2-120, P2-121 і P2-122, гетэрадыны ў дыяпазоне частот 25,95...78,33 ГГц, камплект полых дыэлектрычных прамяняводаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Прапанавана прымяненне радыёпаглынальнага вугляродазмяшчальнага матэрыялу на элементах канструкцыі шматмодавых цыліндрычных і адкрытых квазіаптычных рэзанатараў прахаднога тыпу, якое дазволіла павысіць іх дабротнасць на 30% у дыяпазоне частот 25,95...78,33 ГГц. Паказана, што элементы сувязі на аснове напайпразрыстай рашоткі і адрэзка нерэгулярнага хвалявода забяспечваюць шырокапалоснае ўзгадненне высокадабротных ЗВЧ-рэзанатараў прахаднога тыпу з адномодовымі хваляводамі ў дыяпазоне частот не менш за 1/2 актавы з КСХ < 1,7 без падрэгулявання і дазваляюць кіраваць дабротнасцю сувязі ў межах 45000 да 66 000 шляхам варыяцыі канструктыўных параметраў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: распрацаваныя мадэлі і ўдасканаленыя канструкцыі ЗВЧ-рэзанатараў могуць быць скарыстаны для разліку параметраў вузлоў і ЗВЧ-сістэм, для якіх патрабуецца высокая дыхтоўнасць у пашыраным дыяпазоне даўжынь хваль.

Вобласць ужывання: Высокадабротныя аб'ёмныя і адкрытыя рэзанатары прахаднога тыпу ў дыяпазоне частот 25,95...78,33 ГГц могуць прымяняцца ў сучаснай радыётэхніцы для частотнага фільтравання электрамагнітных ваганняў, рэалізацыі зваротнай сувязі пры іх узмацненні і генерацыі, пры вымярэнні характарыстык матэрыялаў, для стварэння прамысловых устаноў і абсталявання, у аснове якіх ляжыць прынцып назапашвання электрамагнітнай энергіі ў рэзанансным аб'ёме.

РЕЗЮМЕ

Танана Ольга Валерьевна

Широкодиапазонные высокочастотные резонаторы проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонентов

Ключевые слова: высокочастотные широкодиапазонные резонаторы проходного типа, цилиндрический резонатор, открытый резонатор, миллиметровые волны, элементы связи, углеродосодержащие радиопоглощающие материалы.

Цель работы: научное обоснование усовершенствованных методик расчета и конструкций высокочастотных широкодиапазонных резонаторов проходного типа миллиметрового диапазона длин волн с использованием углеродосодержащих компонент, оценка условий согласования таких резонаторов с волноводными линиями передач, разработка рекомендаций по практическому применению высокочастотных резонаторов в технических средствах и системах СВЧ-диапазона.

Методы исследования: аналитические и численные методы электродинамического моделирования, сверхвысокочастотные измерения добротности, коэффициента стоячей волны, коэффициента отражения и величины ослабления.

Использованная аппаратура: векторный анализатор цепей Anritsu MS4644B, измеритель КСВН и ослаблений панорамный P2-120, P2-121 и P2-122, гетеродины в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц, комплект полых диэлектрических лучеводов.

Полученные результаты и их новизна: Предложено применение радиопоглощающего углеродосодержащего материала на элементах конструкции многомодовых цилиндрических и открытых квазиоптических резонаторов проходного типа, позволившее повысить их добротность на 30% в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц. Показано, что элементы связи на основе полупрозрачной решетки и отрезка нерегулярного волновода обеспечивают широкополосное согласование высокочастотных СВЧ-резонаторов проходного типа с одномодовыми волноводами в диапазоне частот не менее 1/2 октавы с КСВ < 1,7 без подрегулировки и позволяют управлять добротностью связи в пределах от 45 000 до 66 000 путем вариации конструктивных параметров.

Рекомендации по использованию: разработанные модели и усовершенствованные конструкции СВЧ-резонаторов могут быть использованы для расчета параметров узлов и СВЧ-систем, которым требуется высокая добротность в расширенном диапазоне длин волн.

Область применения: Широкодиапазонные высокочастотные резонаторы проходного типа в диапазоне частот 25,95...78,33 ГГц могут применяться в современной радиотехнике для частотной фильтрации электромагнитных колебаний, реализации обратной связи при их усилении и генерации, при измерении характеристик материалов, для создания промышленных установок и оборудования, в основе которых лежит принцип накопления электромагнитной энергии в резонансном объеме.

SUMMARY

Tanana Olga Valerievna

Wide-range high-Q resonators of the pass-through type in the millimeter wavelength range using carbon-containing components

Keywords: high-quality wide-range pass-through resonators, multimode cylindrical resonator, open quasi-optical resonator, millimeter waves, communication elements, carbon-containing radio-absorbing materials.

Purpose of the work: scientific substantiation of improved calculation methods and designs of high-quality wide-range resonators of the pass-through type in the millimeter wavelength range using carbon-containing components, assessment of the conditions for matching such resonators with waveguide transmission lines, development of recommendations for the practical use of high-quality resonators in technical means and systems of the microwave range.

Research methods: analytical and numerical methods of electrodynamic modeling, microwave measurements of quality factor, standing wave coefficient, reflection coefficient and attenuation value.

Used equipment: Anritsu vector network analyzer MS4644B, panoramic VSWR and attenuation meter R2-120, R2-121 and R2-122, local oscillators in the frequency range 25.95...78.33 GHz, set of hollow dielectric beam guides.

The results obtained and their novelty: The use of radio-absorbing carbon-containing material on the structural elements of multimode cylindrical and open quasi-optical pass-through resonators is proposed, which makes it possible to increase their quality factor by 30% in the frequency range 25,95...78,33 GHz. It is shown that coupling elements based on a translucent grating and a segment of irregular waveguide provide broadband matching of high-quality pass-through microwave resonators with single-mode waveguides in the frequency range of at least 1/2 octave with SWR < 1,7 without adjustment and allow control of the coupling quality factor ranging from 45 000 to 66 000 by varying design parameters.

Recommendations for use: the developed models and improved designs of microwave resonators can be used to calculate the parameters of components and microwave systems that require high quality factor in an extended range of wavelengths.

Scope: High-quality volumetric and open pass-type resonators in the frequency range 25.95...78.33 GHz can be used in modern radio engineering for frequency filtering of electromagnetic oscillations, implementing feedback during their amplification and generation, when measuring the characteristics of material, for creating industrial installations and equipment based on the principle of accumulation of electromagnetic energy in a resonant volume.

Научное издание

**Танана
Ольга Валерьевна**

**ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ ВЫСОКОДОБРОТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ
ПРОХОДНОГО ТИПА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛИН ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ
КОМПОНЕНТОВ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.07 – антенны, СВЧ устройства и их технологии**

Подписано в печать 14.12.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч. изд. л. 1,5. Тираж 60. Заказ 246.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
«2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.