

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Айвазяна Мартина Цолаковича** “Теоретические и технологические основы разработки пассивных устройств больших мощностей терагерцового диапазона”, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.01 – “Радиотехника, радиочастотные устройства, системы, технологии”

Актуальность темы диссертационной работы

Терагерцовый диапазон позволяет существенно расширить полосы рабочих частот, что увеличивает информационную емкость канала связи, а это в свою очередь позволяет увеличить скорость передачи информации и в настоящее время рассматривается как основа будущей 6G систем. В этом диапазоне можно реализовать антенны с игольчатыми диаграммами направленности, это повышает разрешающую способность радиолокационных систем и позволяет обнаруживать объекты весьма малых размеров. Этот диапазон открывает большие перспективы и в медицине, так оно неинвазивно, в отличие от рентгеновского, не наносит вреда живым тканям. Здесь контрастность изображения оказывается значительно выше, чем при традиционном рентгенологическом или ультразвуковом обследовании. В этом же диапазоне частот лежат колебательные и вращательные спектры большинства биомолекул, что определяет перспективность THz-диагностики. Для реализации указанных перспективных направлений актуальнейшей задачей является исследование и разработка адекватных электродинамических структур.

В настоящее время в качестве направляющих систем в терагерцовом диапазоне используются направляющие системы как открытого, так и закрытого типа. На основе известных направляющих систем к настоящему времени для терагерцового диапазона делаются попытки создания функциональных элементов с приемлемыми электрическими характеристиками. Создания полного комплекта функциональных элементов волноводных трактов, препятствуют трудности принципиального характера.

Для освоения терагерцового диапазона важной задачей является создание направляющих систем и функциональных элементов СВЧ трактов с требуемыми характеристиками.

Решение этой задачи представляется весьма актуальным.

Научные положения диссертации, выносимые на защиту

В диссертационной работе представлены следующие научные положения:

- рекомендованным размером ДК (диэлектрический канал)–волновода является семикратное превышение его поперечного сечения над длиной волны ($2a \geq 7\lambda$);
- поляризационная устойчивость в волноводных трактах и в функциональных элементах обеспечивается прямоугольной (квадратной) формой поперечного сечения ДК-волновода;
- в круглом металлодиэлектрическом волноводе нельзя обеспечить “чисто атирезонансных условий”;
- для высокоэффективного возбуждения ДК-волноводов следует использовать возбудители с двумя металлическими пластинами;
- волноводный тройник с квазиоптическими уголками позволяет реализовать широкополосный делитель мощности независимо от поляризации волны;
- для создания устройств, в работе которых используется поворот плоскости поляризации рабочей волны, следует использовать волноводы, рабочие моды которых обладают “поляризационным безразличием”;
- малые токи на стенках металлодиэлектрического волновода, позволяют создавать на его основе СВЧ схемы в модульном исполнении;
- требования к точности изготовления фланцевых соединений функциональных элементов на основе металлодиэлектрических волноводов на два порядка ниже, чем в металлических волноводах;
- металлодиэлектрические волноводы позволяют создавать полный комплект функциональных элементов волноводных трактов.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов, списка литературы, включающего 172 наименования, и приложения. Общий объем диссертации составляет 250 страниц, включая 100 рисунков и 9 таблиц.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации, представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены типы направляющих систем как открытого, так и закрытого типов. Здесь же дается постановка задачи диссертационной работы.

Во второй главе подробно рассмотрены основные особенности и технические характеристики волноводов класса “полый диэлектрический канал”. Обоснована способность волновода пропускать большие уровни мощности.

Третья глава посвящена исследованию возбуждения рабочей моды металлодиэлектрического волновода как прямоугольного так и круглого поперечных сечений. Предложен оригинальный метод высокоэффективного возбуждения рабочей моды обоих типов волноводов с использованием рупорно–пластинчатых переходов.

В четвертой главе рассмотрены способы деления и сложения сигналов в терагерцовом диапазоне. Особо следует отметить работу предложенного автором широкополосного трехдецибелного делителя мощности. Предлагается такой делитель использовать в качестве широкополосного мультиплексора.

В пятой главе при помощи граничных условий Сивова-Вайнштейна решена задача прохождения плоской электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток.

В шестой главе рассмотрены способы согласования продольно намагниченной анизотропной среды со свободным пространством. Предложен оригинальный экспериментальный способ прецизионного согласования ферритового образца. Создан ряд взаимных функциональных элементов с высокими электрическими характеристиками.

В седьмой главе рассмотрены технологические особенности создания пассивных устройств терагерцового диапазона на основе ДК–волноводов. Впервые предложен способ изготовления СВЧ схем терагерцового диапазона в модульном исполнении на основе металлодиэлектрического волновода.

В заключении приведены основные результаты работы.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна работы определяется следующими, впервые полученными результатами:

1. Обоснован выбор волноводов класса “полый диэлектрический канал” как основной направляющей системы терагерцового диапазона.
2. Предложен новый метод высокоэффективного возбуждения рабочих мод ДК – волноводов.
3. Впервые решена задача прохождения электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток.

4. Показано, что широкополосное мультиплексирование сигналов в терагерцовом диапазоне, обеспечивается при помощи квазиоптических уголков, при этом в разработанных устройствах мультиплексирование сигналов не зависит от поляризации рабочей волны.
5. Предложен метод прецизионного согласования ферритовых образцов для работы в широкополосных невзаимных элементах на эффекте Фарадея.
6. Разработан полный комплект пассивных функциональных элементов терагерцового диапазона с высокими электрическими характеристиками для работы при больших уровнях мощности.
7. Предложена технология изготовления СВЧ схем в модульном исполнении на основе ДК-волноводов.

Практическая значимость и достоверность полученных результатов

Теоретически и экспериментально показаны преимущества ДК-волноводов перед другими типами направляющих систем, которые предлагаются в научной литературе. Из-за принципиальных особенностей на основе известных направляющих систем не удастся реализовать ряд функциональных элементов. На основе ДК-волноводов автором диссертационной работы создан полный комплект функциональных элементов с высокими электрическими характеристиками. Это позволяет реализовать СВЧ схемы различного назначения терагерцового диапазона.

Практическая значимость разработанных и предложенных алгоритмов состоит в существенном повышении эффективности расчета основных электрических характеристик функциональных элементов терагерцового диапазона.

Предложенные в работе модели основываются на корректном применении электродинамических методов расчета и математического аппарата. Все утверждения подтверждены ссылками на источники. Результаты экспериментов хорошо совпадают с расчетными. Это делает возможным считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

Автореферат диссертации и опубликованные автором работы в полной мере отражают основное содержание диссертации.

Такое многопрофильное исследование, а также представленные результаты вряд ли позволили бы избежать некоторых недостатков, из которых можно отметить следующие:

1. В работе рассмотрены волноведущие свойства направляющих систем как открытого, так и закрытого типов, однако не приведены сведения по электрическим характеристикам функциональных элементов на основе этих направляющих систем.

2. В квазиоптическом аттенуаторе на трех решетках, вносимое затухание зависит от частоты. Автором не указывается способ устранения этого недостатка. Здесь же не рассматриваются современные эффективные методы управления поляризации с применением метаматериалов.

3. В настоящее время бурно развивается ТГц-микрорелектроника и было бы желательно увидеть в диссертации методы сопряжения предложенных волноводов с линиями передач, характерными для СВЧ-микрорелектроники, например с копланарными.

4. В диссертационной работе содержится большой объем расчетов сложных электродинамических структур, однако не применены современные мощные методы компьютерного моделирования, например, "Comsol", позволяющие детальное определение распределения электромагнитных полей.

Отмеченные недостатки не снижают значимости теоретических и практических результатов диссертации. В целом, результаты, полученные автором, являются новыми научным направлением в области принципов создания функциональных элементов волноводных трактов для терагерцового диапазона.

Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Диссертация имеет прикладной и теоретический характер.

Сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов подтверждены актами внедрения. Научные выводы диссертационного исследования рекомендуется использовать при создании функциональных элементов и СВЧ схем различного назначения терагерцового диапазона.

Заключение. Диссертационная работа Айвазяна Мартина Цолаковича на соискание ученой степени доктора технических наук является работой, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, которые можно квалифицировать как научное достижение в виде решения научной проблемы по освоению терагерцового диапазона. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе теоретических и экспериментальных исследований. Диссертационная работа написана

доходчиво, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

Диссертационная работа Айвазяна Мартина Цолаковича на тему “Теоретические и технологические основы разработки пассивных устройств больших мощностей терагерцового диапазона” полностью удовлетворяет требованиям ВАК Республики Армения, указанным в “Положении о порядке присуждения ученых степеней”, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени доктора технических наук по специальности Е.12.01 – Радиотехника, радиочастотные устройства, системы, технологии.

д.ф.-м.н., проф.

Ахучян А.А.

Ֆ.ս.գ.դ. Ա.Ա.Հախումյանի ստորագրությունը հաստատում եմ՝

ՀՀ ԳԱԱ ՌՖԷԻ գիտական գծով փոխտնօրեն

Մամարյան Է.Ա.

