

## 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**

В последние годы резко возрос интерес исследователей к терагерцовому диапазону, что связано с широким спектром возможных практических применений. Это в первую очередь связано с расширением полосы рабочих частот, что увеличивает информационную емкость канала связи, а это в свою очередь позволяет увеличить скорость передачи информации. В этом диапазоне антенны радиолокационных станций имеют весьма малые размеры. Это позволяет реализовать антенны с игольчатыми диаграммами направленности, что повышает разрешающую способность системы слежения и позволяет обнаруживать объекты малых размеров. Открываются большие перспективы и в медицине, так как терагерцовое излучение, в отличие от рентгеновского, не наносит вреда живым тканям, поскольку для получения снимка достаточно очень слабого и очень короткого импульса. При этом контрастность изображения оказывается значительно выше, чем при традиционном рентгенологическом или ультразвуковом обследовании.

В настоящее время в качестве направляющих систем в терагерцовом диапазоне как правило используются направляющие системы открытого типа. На основе известных направляющих систем к настоящему времени для терагерцового диапазона созданы лишь некоторые функциональные элементы с приемлемыми электрическими характеристиками. Что же касается создания полного комплекта функциональных элементов волноводных трактов и технологии их изготовления, препятствуют трудности принципиального характера.

Для успешного освоения терагерцового диапазона важной научно-технической задачей является создание направляющих систем и функциональных элементов СВЧ трактов с требуемыми характеристиками, а также технологии их изготовления.

Решение этой задачи представляется весьма актуальным.

### **Научные положения диссертации, выносимые на защиту**

В диссертационной работе представлены следующие научные положения:

- Рекомендованным размером ДК-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 антирезонансных 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. На основании проведенного исследования делается вывод о целесообразности применения волноводов класса “полый диэлектрический канал” как основной волноведущей системы терагерцового диапазона. Здесь же дается постановка задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** подробно рассмотрены основные особенности и технические характеристики волноводов класса “полый диэлектрический канал”. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений затухания в волноводах как прямоугольного (квадратного), так круглого поперечных сечений. Обоснована способность волновода пропускать большие уровни мощности.

**Третья глава** посвящена исследованию возбуждения рабочей моды металлodieлектрического волновода как прямоугольного так и круглого поперечных сечений. Предложен оригинальный метод высокоэффективного возбуждения рабочей моды обоих типов волноводов с использованием рупорно–пластинчатых переходов. Обосновано применение возбуждателей, в которых в выходной части рупора используются две металлические пластины. Результаты измерения эффективности возбуждения рабочих мод для волноводов обоих сечений хорошо совпадают с расчетными.

**В четвертой главе** рассмотрены способы деления и сложения сигналов в терагерцовом диапазоне. Рассмотрены устройства в которых в качестве делителя мощности выступает либо диэлектрическая пленка, либо частопериодическая решетка. Особо следует отметить работу предложенного автором широкополосного трехдецибельного делителя мощности. Здесь деление мощности не зависит от поляризации сигнала и частоты. Предлагается такой делитель использовать в качестве широкополосного мультиплексора.

**В пятой главе** с применением граничных условий Сивова-Вайнштейна решена задача прохождения плоской электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток. Получены аналитические выражения для коэффициентов передачи и отражения от такой системы, позволяющие вычислять эти коэффициенты при произвольных расстояниях между решетками и ориентациями их проводников.

**В шестой главе** рассмотрены способы согласования продольно намагниченной анизотропной среды со свободным пространством. Показано, что в терагерцовом диапазоне в намагниченном до насыщения ферритовом образце недиагональные компоненты тензора магнитной проницаемости малы. Это позволяет осуществить согласование при помощи просветляющих четвертьволновых диэлектрических слоев. Предложен оригинальный способ прецизионного согласования ферритового образца. Создан ряд невзаимных функциональных элементов с высокими электрическими характеристиками.

**В седьмой главе** рассмотрены технологические особенности создания пассивных устройств терагерцового диапазона на основе ДК-волноводов. Показано, что токи рабочей моды прямоугольного ДК-волновода ниспадают практически до нуля у стенок волновода, тем самым уменьшая погонные потери рабочей моды. 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. Теоретически и экспериментально доказан новый метод высокоэффективного возбуждения рабочих мод ДК-волноводов.
3. Впервые решена задача прохождения электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток.
4. Теоретически и экспериментально доказано, 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 волноводов класса “полый диэлектрический канала”.

#### **Практическая значимость и достоверность полученных результатов**

Впервые теоретически и экспериментально показаны преимущества металлодиэлектрических волноводов перед другими типами направляющих систем, которые в научной литературе предлагаются для освоения терагерцового диапазона. Из-за принципиальных особенностей на основе известных направляющих систем не удается реализовать ряд функциональных элементов. Автором диссертационной работы, на базе металлодиэлектрических волноводов, создан полный комплект

функциональных элементов волноводных трактов с высокими электрическими характеристиками. Это позволяет создавать СВЧ схемы различного назначения для освоения 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 соответствуют излагаемой теории. Это дает основание считать полученные результаты достаточно обоснованными и достоверными.

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

Методология такого многопрофильного исследования, а также представление результатов вряд ли позволили бы избежать некоторых недостатков, из которых отметим следующие:

1. В работе рассмотрены волноведущие свойства различных типов направляющих системы терагерцового диапазона, однако отсутствуют сведения по функциональным элементам на основе этих систем.

2. Отсутствуют сведения по предельной намагниченности ферритового образца, при котором обеспечивается эффективное согласование при помощи однослойного диэлектрического покрытия.

3. Недостаточно подробно описана технология изготовления СВЧ схемы прессованием в пластмассе, в частности не ясно какой металл использовать для гальванического нанесения на пластмассовые стенки модуля и какой толщины.

4. В диссертационной работе имеются некоторые опечатки и неудачные стилистические формулировки.

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, выдвигаемые 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 научно квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых 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” соответствует критериям, 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.

Школа электротехники, Инженерный факультет  
имени Айби и Аладар Фляйшман,

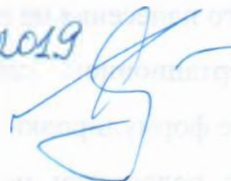
Тель-Авивский университет.

д.ф.-м.н., старший научный сотрудник 22.12.2019 Гарб Х. Л.

Подпись Гарба Х.Л. удостоверяю:

Секретарь школы электротехники

22.12.2019



Веред Шпигель