

## 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 Е.12.01 – “Радиотехника, радиочастотные устройства, системы, технологии”

### **Актуальность темы**

Диссертация М.Ц. Айвазяна является развитием направления по освоению терагерцового диапазона, открывающего новые возможности в вопросе высокоскоростной передачи данных. Для нее этот диапазон позволяет организовать сверхширокополосные каналы связи. В зависимости от индекса квадратурной модуляции, для обеспечения скорости передачи данных в несколько гигабит в секунду, потребуется полоса пропускания в несколько гигагерц. Внедряется использование частот в несколько десятков гигагерц для сотовой связи пятого поколения, а также для реализации управления работой транспортных средств с помощью радаров. Терагерцовый диапазон открывает большие перспективы и в медицине. Терагерцовое излучение, в отличие от рентгеновского, не наносит вреда живым тканям. Для получения контрастного и качественного снимка внутренних органов больного достаточен слабый и кратковременный импульс, в отличие от традиционных рентгенологического или ультразвукового обследований.

Для исследования возможностей использования любого сверхвысокочастотного диапазона определяющими факторами являются наличие направляющей системы этого диапазона и наличие, на основе этих систем, полного комплекта функциональных элементов волноводных трактов для создания измерительных приборов. На основе известных направляющих систем к настоящему времени для терагерцового диапазона созданы лишь некоторые функциональные элементы с приемлемыми электрическими характеристиками. Создание полного комплекта функциональных элементов волноводных трактов для терагерцового диапазона и технологии их изготовления представляется сложной, но важной научно-технической задачей. С этой точки зрения работа, выполненная М.Ц. Айвазяном, является весьма своевременной и актуальной.

### **Характеристика содержания диссертации**

Диссертационная работа изложена на 250 страницах, состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 172 источников и приложения, включающего три акта внедрения; содержит 100 иллюстраций 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 используемых в терагерцовом диапазоне. На основании выполненного анализа этих систем показаны основные преимущества волноводов класса "полый диэлектрический канал" и сформулирована постановка задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** подробно рассмотрены основные волноведущие свойства волноводов класса "полый диэлектрический канал". Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений затухания в волноводах квадратного и круглого поперечных сечений. Показана способность волновода пропускать мощности больших уровней.

**В третьей главе** исследуются способы высокоэффективного возбуждения рабочей моды металлодиэлектрического волновода как прямоугольного, так и круглого поперечных сечений. Предложен новый метод высокоэффективного возбуждения рабочей моды обоих типов волноводов. Экспериментально измеренное значение эффективности возбуждения рабочей моды довольно высоко и для волновода квадратного сечения хорошо согласуется с расчетными.

**В четвертой главе** рассмотрены устройства деления мощности с применением диэлектрической пленки и частопериодической решетки. Автором предложен и рассмотрен широкополосный трехдецибелный делитель мощности, в котором деление мощности не зависит от поляризации сигнала. Предлагается схема мультиплексирования, в которой разработанный делитель используется в качестве широкополосного мультиплексора.

**В пятой главе** теоретически решена задача прохождения плоской электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток. Решение основано на применении более точных граничных условий Сивова-Вайнштейна, учитывающих влияние местных волн на поверхности частопериодической решетки. Показано, что для решеток, применяемых в терагерцовом диапазоне, решение такой задачи возможно и с применением граничных условий анизотропно проводящей

поверхности – граничных условий Владимирского. Получены аналитические выражения для коэффициентов передачи и отражения такой системы, позволяющие вычислить упомянутые коэффициенты при произвольных расстояниях между решетками и ориентации их проводников.

**В шестой главе** разработаны способы согласования продольно намагниченной до насыщения анизотропной среды со свободным пространством. Показано, что недиагональные компоненты тензора магнитной проницаемости ферритового образца, намагниченного до насыщения, малы. Это позволяет осуществить согласование при помощи четвертьволновых диэлектрических слоев. Предложен оригинальный способ отдельного прецизионного согласования каждой грани ферритового образца. Созданы следующие функциональные элементы: электрически управляемый аттенюатор, антенный переключатель, модулятор и циркулятор.

**В седьмой главе** рассмотрены поле и токи рабочей моды прямоугольного ДК-волновода. Показано, что токи на стенках волновода практически отсутствуют. Это дает возможность изготавливать волноводные элементы из составных частей, в частности, фрезерованием или штампованием в пластмассе. Предложен способ изготовления СВЧ схем терагерцового диапазона в интегральном исполнении на основе металлодиэлектрического волновода.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

**Научная новизна заключена и подтверждается** в следующих основных результатах диссертационной работы:

- обосновано применение и использование волноводов класса “полый диэлектрический канал” в качестве высокоэффективной направляющей системы терагерцового диапазона;
- теоретически рассмотрен предлагаемый новый метод возбуждения рабочих мод ДК-волноводов и экспериментально показана высокоэффективность метода;
- теоретически решена задача прохождения электромагнитной волны сквозь систему, состоящую из произвольного числа частопериодических решеток;
- теоретически рассмотрена задача широкополосного мультиплексирования сигналов в терагерцовом диапазоне на основе системы, применяющей квазиоптические уголки. При этом мультиплексирование сигналов не зависит от поляризации рабочей волны, что подтверждено экспериментальными исследованиями разработанных мультиплексоров;

- предложен метод прецизионного согласования ферритовых образцов для работы в широкополосных невзаимных элементах на основе эффекта Фарадея;
- разработан полный комплект пассивных функциональных элементов терагерцового диапазона с высокими электрическими характеристиками для работы при больших уровнях мощности;
- предложена технология изготовления СВЧ схем в модульном исполнении на основе волноводов класса “полый диэлектрический канала”.

### **Практическая значимость полученных результатов**

На основе известных направляющих систем, из-за их особенностей, принципиально не удастся реализовать ряд функциональных устройств. Созданный автором диссертационной работы, на базе металлодиэлектрических волноводов, полный комплект функциональных элементов волноводных трактов с высокими электрическими характеристиками позволяет создавать СВЧ схемы различного назначения при освоении терагерцового диапазона. При этом:

- достаточно семикратное превышение размера поперечного сечения ДК-волновода над длиной волны ( $2a \geq 7\lambda$ );
- высокоэффективное возбуждение ДК-волноводов выполняется возбудителем лишь с двумя металлическими пластинами;
- применение разработанных узлов существенно снижает потери при передаче сигнала по сравнению с применением некоторых из существующих аналогов на одномодовых волноводах.
- разработанный тракт ДК-волноводов обладает свойством “поляризационного безразличия” и частотной широкополосностью;
- требования к точности изготовления фланцевых соединений функциональных элементов на основе металлодиэлектрических волноводов на два порядка ниже, чем в металлических волноводах;
- тракт из последовательности разработанных элементов проще по технологии изготовления.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается выбором математических моделей, адекватных реальным физическим объектам, а также использованием строгих математических методов решения задач электродинамики. Достоверность основана на корректном применении электродинамических методов расчета и математического

аппарата и достаточно хорошей согласованностью теоретических и экспериментальных результатов исследования основных электрических характеристик разработанных функциональных элементов. Результаты работы подтверждены соответствующими актами внедрения в трех организациях.

**Апробация полученных результатов**

Основные результаты работы докладывались на конференциях международного уровня и содержатся в 24-х научных публикациях, 8 статей из которых занесены в базу SCOPUS.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и полностью отражает тематику диссертации.

**Замеченные недостатки**

1. В параграфе 4.1 рассмотрена работа трехдецибельного делителя мощности сигнала на основе диэлектрической пленки при его перпендикулярной поляризации. Отсутствуют сведения по такому же делителю при параллельной поляризации сигнала.

2. Для некоторых из разработанных устройств не приводится достаточных обоснований их функционирования при больших уровнях мощности.

3. В ряде мест отсутствуют пробелы между словами, что затрудняет чтение диссертации, и существуют опечатки и стилистические недочеты.

4. Желательно было бы каждую главу оканчивать кратким резюме – выводом. Хотя, справедливости ради, надо отметить наличие неотмеченных очень кратких выводов по главам диссертации в заключении, что несколько увеличило в нем объём изложения наиважнейших результатов диссертационной работы.

**Заключение**

Отмеченные недостатки ни в коей мере не снижают значимость результатов выполненной диссертации на тему *“Теоретические и технологические основы разработки пассивных устройств больших мощностей терагерцового диапазона”*. Полученные результаты являются новыми научными достижениями в развитии направления освоения терагерцового диапазона, а именно: в областях проектирования и создания функциональных элементов его волноводных приемо-передающих трактов. Они соответствуют целям и задачам, заявленным в работе, являющейся логически завершенным научным исследованием прикладного и теоретического характера и выполненной на высоком научно-техническом уровне.

Своей актуальностью, научной новизной, практической значимостью, достоверностью и уровнем научных публикаций диссертационная работа Айвазяна М. Ц. отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а сам Айвазян М. Ц заслуживает присвоения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности Е.12.01 – Радиотехника, радиочастотные устройства, системы, технологии.

Официальный оппонент, д.т.н., профессор  
кафедры «Телекоммуникаций»  
Российско-Армянского университета

Аветисян В.Г.

Подпись Аветисяна В.Г. удостоверяю  
Ученый секретарь  
Российско-Армянского университета



Аветисян Л.Р.

31.05.2020г.