

ОТЗЫВ

официального оппонента Горбачева Анатолия Петровича на диссертационную работу Ле Куанг Туен *«Экспериментально – аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора»*, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ – устройства и их технологии».

Актуальность темы исследования

Предельно достижимые показатели устройств СВЧ в значительной мере зависят от применяемых материалов и компонентов. Современные системы автоматизированного проектирования СВЧ –устройств требуют надежных точных данных по характеристикам входящих в них проводников и диэлектриков, которые могут быть получены лишь экспериментальным путем. Точные измерительные устройства, приборы и их расчетные модели актуальны как в этой задаче, так и в области техники СВЧ.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Содержание диссертации изложено на 139 страницах, включает 58 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 78 наименований.

Целью работы является разработка расчетной модели измерительного коаксиального резонатора с «укорачивающим» измерительным зазором для исследования свойств диэлектрических материалов и экспериментальное уточнение параметров расчетной модели. Для достижения цели в задачи работы включена разработка конструкции и практическая реализация экспериментального измерительного коаксиального резонатора.

Результаты диссертационного исследования докладывались на трех Всероссийских научно-технических конференциях, изложены в 11 публикациях, в т. ч. в четырех статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

Во введении приведены общие сведения по теме исследования и обоснована ее актуальность. Отмечено, что несмотря на освоенность дециметрового диапазона

электромагнитных волн, разработка измерительных устройств метрологического уровня точности в данном диапазоне актуальна и имеет нерешенные проблемы.

В первом разделе представлен обзор основных типов коаксиальных резонаторов и методов расчета их характеристик. Проанализированы коаксиальные резонаторы различных типов, включая открытые коаксиальные резонаторы, их конструкции и области применения. Сделан вывод, что закрытый цилиндрический коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (КРУЕ) имеет преимущества для исследований диэлектриков в дециметровом диапазоне. Одним из преимуществ является возможность использования диэлектрических образцов унифицированных размеров, используемых в диапазонах от НЧ до частот субмиллиметрового диапазона. Другое преимущество связано с высокой степенью включения образца в поле резонатора и высокой добротностью резонатора, что обеспечивает его чувствительность к малым диэлектрическим потерям.

Во втором разделе излагается разработанный подход к расчету КРУЕ с двумя коаксиальными частями (двойного КРУЕ): разделение его на два одинарных, квазистационарный расчет и многоволновая модель на основе данного подхода, а также численное моделирование двойного КРУЕ. Новым является представление несимметричного двойного КРУЕ в виде двух одинарных КРУЕ с различными высотами укорачивающих зазоров и одинаковой резонансной частотой, равной частоте исходного резонатора. Анализ структуры поля основной моды в области зазора и в коаксиальных частях резонатора позволил сделать вывод о существовании в области зазора поверхности – "электрической" стенки – с нулевой радиальной компонентой электрического поля, что позволило разделить по этой виртуальной поверхности двойной КРУЕ с низшей модой на два одинарных. Это конкретизирует зависимость поля от продольной координаты и ограничивает вид функций, пригодных для представления поля.

В разработанной многоволновой модели КРУЕ расчет резонансной частоты проведен известным методом частичных областей с разделением двойного резонатора на два одинарных с коаксиальными частями и укорачивающими зазорами различной высоты, дающими в сумме высоту зазора двойного КРУЕ. Частоты одинарных КРУЕ монотонно возрастают с ростом зазоров, при этом росту зазора в одном одинарном КРУЕ соответствует уменьшение зазора в другом, так что их частоты изменяются противоположным образом и совпадают при некотором положении «электрической» стенки в зазоре двойного резонатора, которое дает значения зазоров в одинарных резонаторах. Задача сведена к поиску нуля определителя матрицы как функции частоты. Размерность матрицы задается числом учитываемых мод. Показана сходимость решения к пределу при увеличении числа учитываемых мод и близость решения к эксперименту.

Выявлена необходимость учета большого числа мод (70 и более) для достижения требуемой точности расчета. Многоволновая модель реализована в компьютерной программе, зарегистрированной в Федеральном агентстве РФ по интеллектуальной собственности.

Численное моделирование резонатора выполнено в среде CST Studio Suite и показало совпадение с экспериментом. При моделировании выяснен вид поверхности – «электрической» стенки с нулевой радиальной электрической компонентой в области зазора и получено распределение осевой компоненты электрического поля по радиусу резонатора, что важно для практических приложений и аналитических моделей КРУЕ.

В третьем разделе описан разработанный измерительный КРУЕ и его экспериментальное исследование. Его особенностью является перестройка резонансной частоты за счет деформации упругой стенки- мембраны и неизлучающая щель-окно для ввода измеряемого образца. Приведены экспериментальные зависимости резонансной частоты и добротности от величины укорачивающего зазора. Отказ от электрода – сильфона и обычного излучающего отверстия для ввода образца позволил получить добротность, близкую к теоретически достижимой. Конструкция резонатора защищена патентом РФ.

Для оценки реальной точности расчетных моделей КРУЕ проведены измерения внутренних размеров разработанного резонатора по разработанной методике с использованием спектра резонансных частот высших типов колебаний, что представляется перспективным в точных измерениях. Исследовано влияние конического прогиба стенки-мембраны и показана возможность замены в расчетах конической торцевой стенки резонатора на плоскую поверхность на эффективной высоте, для которой получено аналитическое выражение. Экспериментально оценено смещение резонансной частоты гофрированной поверхностью стенки- мембраны относительно резонатора с плоской стенкой.

В четвертом разделе представлены исследования измерительного КРУЕ с диэлектрическим включением и измерения диэлектрических материалов в дециметровом диапазоне. Центрирование образца в зазоре обеспечивают три тонкие диэлектрические нити, параллельные центральным электродам. В отверстиях верхней крышки резонатора установлены видеокамера с подсветкой внутреннего объема резонатора для наблюдения процесса ввода-вывода образца. В качестве основного выбран широко используемый типоразмер образца в виде диска стандартного диаметра, превышающий диаметр электродов.

Численным моделированием оценено влияние периферийной области измеряемого образца за пределами зазора и найдено превышение диаметра образца над диаметром электрода, необходимое для практического исключения влияния периферийной части образца. В квазистационарном приближении найден один обобщенный параметр, практически полностью определяющий зависимость относительного сдвига резонансной частоты диэлектриком и линеаризующий эту зависимость. Параметр зависит от толщины образца, его диэлектрической проницаемости и высоты измерительного зазора. Сведение относительного частотного сдвига резонатора к зависимости от одного параметра вместо трех позволило получить простые аппроксимирующие аналитические выражения для расчета диэлектрических параметров. Несмотря на использование хорошо известного квазистационарного подхода, полученные результаты по коэффициенту заполнения резонатора и зависимости относительного частотного сдвига от параметров образца и измерительного зазора, являются новыми и, несомненно, имеют важное практическое значение.

Приведены результаты измерения диэлектрических параметров материалов с минимальной частотной дисперсией в разработанном КРУЕ с использованием полученных аппроксимирующих аналитических выражений. Сравнение полученных данных с аттестованными эталонными значениями подтвердило корректность предложенного в диссертации подхода. В диссертации проведен подробный анализ составляющих погрешности измерения диэлектрических параметров и получены оценки для расширенной неопределенности результатов.

Показано, что относительная неопределенность измеренных значений диэлектрической проницаемости растет с ее ростом и снижением коэффициента заполнения. Относительная неопределенность измеренных значений диэлектрических потерь также растет с ростом проницаемости и с уменьшением уровня диэлектрических потерь. Предложенный в диссертации подход и полученные результаты сопоставлены с действующими стандартами на диэлектрические измерения в дециметровом диапазоне и показано существенное преимущество по диапазону измеряемых величин и точности измерения. Чувствительность разработанного резонатора диэлектрическим потерям позволяет контролировать современные высококачественные диэлектрики.

В заключении изложены основные результаты диссертации. Диссертация хорошо структурирована, в каждом ее разделе содержатся выводы. Выводы убедительно обоснованы. Основные положения сформулированы четко и подтверждены результатами моделирования и/или точного эксперимента. Оформление диссертации соответствует

предъявляемым требованиям. Автореферат в полной мере отражает структуру и содержание диссертации.

Обоснованность, новизна и достоверность научных положений и выводов

В диссертации получен ряд новых результатов, представляющих научный и практический интерес, а именно:

-показано, что на основном колебании двойного КРУЕ в области межэлектродного зазора существует поверхность, на которой радиальная компонента электрического поля обращается в нуль, что дает возможность разделения на два одинарных с общей резонансной частотой. Численным моделированием выяснен вид этой поверхности;

-конструкция перестраиваемого измерительного КРУЕ с изменением межэлектродного зазора за счет прогиба торцевой стенки-мембраны, обеспечивающая близкую к теоретическому пределу добротность;

-способ определения точных внутренних размеров полых резонаторов по спектру резонансных частот и применение измеряемых образцов с диаметром, превышающим диаметр электродов;

-найден обобщенный безразмерный параметр, определяющий относительный сдвиг резонансной частоты конкретного коаксиального резонатора с диэлектриком как функцию одного этого параметра, что понижает размерность задачи, в общем случае многопараметрической;

-существенное расширение измерительных возможностей коаксиального резонатора с использованием полученных в диссертации результатов.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается применением хорошо исследованных методов анализа, численного моделирования с использованием широко распространенного программного пакета, экспериментами высокой точности на эталонной аппаратуре и сопоставлением полученных результатов диэлектрических измерений с данными независимой аттестации на первичном эталоне диэлектрических параметров.

Теоретическая и практическая значимость работы

Получены новые данные по распределению электромагнитного поля в двойном коаксиальном резонаторе без диэлектрического диска в зазоре, дающие основания для выбора наиболее подходящих собственных функций в аналитическом описании.

Разработаны модели для расчета характеристик КРУЕ с экспериментальной оценкой их точности при независимом точном измерении величины «укорачивающего» зазора.

Получены простые аппроксимирующие выражения для расчета диэлектрических параметров в разработанном измерительном резонаторе по относительному уходу резонансной частоты и изменению добротности. Убедительно показано существенное повышение точности диэлектрических измерений в разработанном подходе над действующими стандартными методами и устройствами.

Разработанный коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором имеет собственную добротность близкую к теоретическому пределу для резонаторов этого типа за счет исключения потерь на излучение, отсутствия подвижных контактов и импедансных гфрированных электродов.

Общая оценка диссертационной работы

Представленная диссертационная работа хорошо структурирована и имеет логическую стройность от постановки задачи, анализа состояния проблемы, теоретических исследований и экспериментов до практической реализации измерительного резонатора, методики диэлектрических измерений в нем и контрольных измерений на аттестованных образцах. Вместе с тем, по работе имеется ряд замечаний.

1. Предложенный подход с разделением двойного коаксиального резонатора плоской «электрической» стенкой на два одинарных (раздел 2) строго справедлив только в случае симметричного резонатора с одинаковыми коаксиальными частями. В резонаторе со смещением зазора от плоскости симметрии «электрическая» стенка перестает быть плоской, что и выяснено в разделе 2 диссертации численным моделированием. Ограничения на возможность представление двойного резонатора в виде двух одинарных не сформулированы. Представляется, что малая интенсивность электрического поля во внешней области межэлектродного зазора в значительной мере снимает эти ограничения, однако их оценка представляется целесообразной.
2. Разработанная многоволновая модель резонатора без диэлектрического включения (раздел 2) далее не используется в расчетных соотношениях для резонатора с диэлектрическим образцом, которые получены в квазистационарном приближении. Таким образом, многоволновая модель представляет собой самостоятельный результат, отдельный от задачи диэлектрических измерений в этом резонаторе. Сделанный вывод (раздел 3) о том, что более высокая точность измерения

достигается при свободном положении образца в зазоре (с воздушным промежутком над ним) существенно усложняет электродинамическую структуру для строгого анализа, что может быть оправданием возврата к квазистационарному рассмотрению с экспериментальным уточнением параметров такой модели.

3. Найденный в диссертации обобщенный параметр для аргумента в зависимости относительного сдвига резонансной частоты диэлектриком линеаризует эту зависимость (рисунок 4.12), однако аппроксимация зависимости проводится полиномом четвертой степени по этому параметру. Если линеаризация приближенная, требующая для точной аппроксимации более сложной функции, чем линейная, то необходимы пояснения.

Перечисленные замечания не снижают научную значимость представленной диссертационной работы, не изменяют существенно полученные результаты и не умаляют мою убежденность в её поддержке. Практическая направленность и законченность работы являются ее весомым преимуществом.

Общее заключение

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Экспериментально – аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора» соответствует пунктам 9-14 «Положения» о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (ред. от 28.08.2017 №1024), так как является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой, содержащей решение задачи создания измерительного резонатора для точных диэлектрических измерений в дециметровом диапазоне волн, а ее автор Ле Куанг Туен заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 «Антенны, СВЧ – устройства и их технологии».

Сведения



Горбачев А.П.

Горбачев Анатолий Петрович, доктор технических наук по специальности 05.12.21 (номенклатура 1999 года), доцент по кафедре «Конструирование и технология радиоэлектронных средств», и.о. профессора по кафедре «Радиоприёмные и радиопередающие устройства» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

630073, Новосибирск, проспект Карла Маркса, дом 20, корпус 4.

Телефон: +7 (383) 346-15-46.

E-mail: gorbachev@corp.nstu.ru

Подпись профессора А. П. Горбачева заверяю.

Начальник отдела кадров НГТУ

Пустовалова Ольга Константиновна

«22» мая 2023 года.

