



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт теоретической и прикладной
электродинамики
Российской академии наук

125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6, ИТПЭ РАН
ОКПО 29012159, ОГРН 1027739263441
ИНН 7713020549, КПП 771301001

тел.: +7 (495) 484 2383
факс: +7 (495) 484 2633
e-mail: itae@itae.ru

УТВЕРЖДАЮ

ВрИО директора ИТПЭ РАН,
доктор физико-математических наук
А.М. Мерзликин



_____ 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук на диссертацию 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».

1. Актуальность темы исследования

Диссертация Ле Куанг Туен посвящена вопросу исследования измерительного коаксиального резонатора с укорачивающей ёмкостью (КРУЕ), который используется для проведения измерений диэлектрической проницаемости различных материалов с малыми электрическими потерями в дециметровом диапазоне длин волн.

Диэлектрические материалы с малыми электрическими потерями используются в различных областях СВЧ-техники, например, в радиопрозрачных укрытиях, в волноводах, в излучателях антенн и т.п. Точное значение диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь материала, который используется в новых проектируемых изделиях СВЧ-техники, является очень важной информацией для разработчиков.

Считается, что наиболее точно значение диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь можно определить резонансными методами. Одним из вариантов резонатора для проведения измерений электродинамических параметров материалов является коаксиальный резонатор с укорачивающей ёмкостью, который позволяет проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости. Таким образом, разработка новых методов расчёта для определения электродинамических параметров КРУЕ, которые в дальнейшем используются при проведении измерений диэлектрической проницаемости материалов, является важной задачей и подтверждает актуальность диссертационной работы Ле Куанг Туен на тему «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора».

2. Цель работы

Объектом исследований в диссертационной работе является коаксиальный резонатор с укорачивающей ёмкостью.

Целью диссертационной работы является разработка расчётной модели измерительного коаксиального резонатора с укорачивающим измерительным зазором для измерения СВЧ параметров диэлектриков и экспериментальное уточнение параметров расчётной модели.

3. Научная новизна исследований

Автором диссертации разработана модель двойного КРУЕ, основанная на методе частичных областей, в которой двойной КРУЕ может быть разделён на два одинарных КРУЕ по поверхности с нулевой радиальной компонентой электрического поля.

Автором предложена и экспериментально реализована новая конструкция перестраиваемого измерительного КРУЕ с изменением межэлектродного зазора за счёт прогиба торцевой стенки-мембраны. Получены экспериментальные и расчётные зависимости смещения резонансной частоты разработанного КРУЕ в зависимости от параметров измеряемого образца.

Найден безразмерный параметр измеряемого образца, определяющий относительный сдвиг резонансной частоты разработанного КРУЕ, что упрощает задачу расчёта параметров диэлектрика в измерительном зазоре в зависимости от смещения резонансной частоты. Разработана методика измерений диэлектрических параметров материалов с помощью разработанного КРУЕ.

4. Практическая значимость работы

Проведённые автором исследования и построенные расчётные модели позволяют решить задачу высокоточного измерения параметров диэлектрических материалов с малым (до 5×10^{-5}) тангенсом диэлектрических потерь.

Разработаны модели для расчёта характеристик КРУЕ и проведены экспериментальные оценки их точности.

Проведённые исследования позволили создать коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым ёмкостным зазором, который имеет собственную добротность 7400, что

позволяет проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости с малыми электрическими потерями. На данный измерительный резонатор получен Патент на изобретение № 2680109.

Автором получен Акт использования результатов его диссертационного исследования в работах по развитию Государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012.

5. Достоверность результатов исследований

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановки задачи, выбором методов ее решения, основывающихся на квазистационарном приближении КРУЕ, электродинамическом методе частичных областей и методе с точной постановкой электродинамической задачи с использованием пакета программ электродинамического моделирования CST Studio Suite 2017. При экспериментальных исследованиях использовался скалярный анализатор цепей P2M-18 с подтверждёнными метрологическими характеристиками.

6. Апробация работы и публикации по диссертации

Диссертация содержит введение, четыре раздела, заключение и список литературы, содержащий 78 источников. Основной текст работы изложен на 139 страницах, проиллюстрирован 58 рисунками и 18 таблицами.

Основные результаты работы докладывались на двух Всероссийских научно-технических конференциях и на одной Всероссийской научно-практической конференции и опубликованы в 11 печатных трудах, в том числе в четырёх статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

7. Содержание и основные результаты работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы. Определены объект, предмет и научная задача исследования, его новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор основных типов коаксиальных резонаторов, которые используются для проведения диэлектрических измерений. Приведены основные методы расчёта характеристик резонаторов: квазистационарный метод, метод частичных областей, методы в точной постановке задачи. По результатам обзора, приведённом в первой главе, сделан вывод, что для улучшения качества диэлектрических измерений в дециметровом диапазоне длин волн актуальной является разработка расчётной модели КРУЕ, а также разработка конструкции КРУЕ с возможностью регулировки измерительного зазора.

Вторая глава посвящена построению модели несимметричного КРУЕ, основанной на его представлении в виде двух одинарных резонаторов с одинаковой резонансной частотой равной резонансной частоте исходного КРУЕ. Такое представление становится возможным, т.к. автор показал, что в КРУЕ существует поверхность с нулевой радиальной составляющей электрического поля. Сравнение результатов расчёта с данными эксперимента показали, что квазистационарный метод расчёта резонансной частоты КРУЕ даёт погрешность порядка 5%, метод частичных областей и метод в точной постановке электродинамической задачи дают погрешности в несколько десятых и в несколько сотых одного процента соответственно.

Третий раздел посвящён разработке КРУЕ с регулируемой высотой зазора, изменение которой позволяет регулировать резонансную частоту в диапазоне от 100 до 650 МГц. В разделе приведены результаты экспериментальных исследований зависимости резонансной частоты и собственной добротности КРУЕ от высоты зазора. Эти зависимости аппроксимированы степенным полиномом.

В четвертом разделе автором представлены исследования факторов, которые влияют на точность измерения диэлектрической проницаемости материалов с помощью КРУЕ. Введена новая переменная, которая зависит от высоты зазора, высоты образца и его диэлектрической проницаемости и именно от которой зависит сдвиг резонансной частоты КРУЕ. Показано, что более точные результаты измерений могут быть достигнуты при гарантированном зазоре между образцом и электродом по сравнению со случаем, когда образец плотно зажимается между электродами.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Автором сделаны выводы о том, что разработанный КРУЕ позволяет в дециметровом диапазоне длин волн проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости при малых электрических потерях (тангенс угла диэлектрических потерь порядка 5×10^{-5}).

К основным и наиболее значимым результатам работы следует отнести:

-разработанный коаксиальный резонатор и методика измерений, которые позволяют проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости материалов с малыми (тангенс угла диэлектрических потерь порядка 5×10^{-5}) электрическими потерями;

- математическая модель КРУЕ, основанная на методе частичных областей, которая позволяет с высокой точностью рассчитывать резонансную частоту.

Автореферат полностью отражает основные положения и результаты исследований, полученные в диссертационной работе.

8. Замечания по работе

Диссертационная работа Ле Куанг Туен заслуживает положительной оценки, однако по ней имеются следующие замечания:

1) Нумерация ссылок на источники выполнена не в порядке их упоминания в тексте. Например, на страницах 4 (ссылка [76]), 16 (ссылка [3]), 22 (ссылки [12-14]), 27 (ссылка [75]) и т.д.

2) На странице 24 опечатка в слове «общим». Грамматические ошибки на странице 45: «При радиусе электродов больше или равен четверть длины волны, квазистационарное приближение уже стало грубой.»; «Приближенный расчет емкости плоского конденсатора – зазора часто применяется при $a \ll \lambda/4$ когда электрическое поле однородно по радиальному направлению.»

3) Фраза на странице 27 «Существование ёмкости боковой области электродов показывает, что сопротивление поверхности внутренних цилиндрических электродов имеет не только индуктивный характер, но и ёмкостный (с большой долей вблизи зазора, рисунок 1.9,б).» выглядит жаргоном. Поверхность электродов является металлической и не может иметь ёмкостного сопротивления. Кроме этого, сопротивление одновременно не может иметь и индуктивный, и ёмкостной характер, а может соответствовать сопротивлению последовательного включения ёмкости и индуктивности.

4) Фраза на странице 49 «Сумма последовательно включенных U_d, U_u, U_C ...» не совсем понятна.

5) Во фразе на странице 54 «Уравнение (2.17) умножим на функцию $r^*1/r = 1...$ » непонятно, на какую функцию проводится умножение, т.к. это выражение является не функцией, а тождеством.

6) Оформление подписей к рисункам 1.15, 1.16, 1.17, 2.5 отличается от оформления подписей к остальным рисункам.

7) В таблице 2.1 величина t_d изменяется на уровне нанометров, что существенно меньше шероховатости поверхности электродов. Изменение резонансных частот одинарных резонаторов при этом в зависимости от t_d происходит в седьмом знаке. Вызывает сомнение целесообразность рассмотрения

столь малых изменений параметров для расчёта характеристик измерительной установки.

Отмеченные недостатки носят частный характер и, в целом, не влияют на высокое качество представленной на отзыв диссертационной работы.

9. Заключение по работе

Вопросы, затронутые в диссертационной работе Ле Куанг Туен, являются актуальными.

Разработана модель измерительного коаксиального резонатора, основанная на методе частичных областей, которая позволяет быстро и точно определять его собственную резонансную частоту.

Проведена оценка точности расчётов с использованием разработанной модели параметров КРУЕ. Погрешность расчёта резонансной частоты в предложенной модели не превышает 0,2 %.

Разработана конструкция КРУЕ с регулируемым измерительным зазором, который обладает высокой добротностью 7400 и возможностью перестройки резонансной частоты от 65 до 650 МГц.

Разработана методика высокоточных измерений диэлектрической проницаемости материалов в дециметровом диапазоне длин волн с малыми электрическими потерями. Чувствительность измерения тангенса диэлектрических потерь в этой методике составляет 5×10^{-5} .

Диссертационная работа Ле Куанг Туен «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора» является завершённой научно-квалификационной работой. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для науки и практики в области разработки СВЧ-техники. Диссертационная работа соответствует

требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Ле Куанг Туен заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Диссертационная работа Ле Куанг Туен обсуждена и единогласно одобрена на семинаре в ИТПЭ РАН «08» июня 2023 года (Протокол семинара № 1 от 08.06.2023 г.).

Ведущий научный сотрудник лаборатории № 6
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной
электродинамики Российской академии наук
(ИТПЭ РАН), кандидат технических наук


Константин Михайлович Басков
«08» июня 2023 г.

Подпись к.т.н. Баскова Константина Михайловича удостоверяю
Заместитель директора ИТПЭ РАН,
доктор физико-математических наук



В.Н. Кисель
«08» июня 2023 г.

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН) Почтовый адрес: РФ, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр.6
Телефон/факс: (495) 485-23-83, 484-26-44, 485-91-72
E-mail: itae@itae.ru;
Веб-сайт: <https://itae.ru>