

УТВЕРЖДАЮ:
Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский
национальный исследовательский
технический университет»




Корняков М. В.

« 11 »  2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»
по диссертации Ле Куанг Туен на тему
«Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального
резонатора»

Диссертация Ле Куанг Туен «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора» выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникационных систем (РЭиТС) Института высоких технологий (ИВТ) ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ) и в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радио-технических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Ле Куанг Туен закончил с отличием по специальности «Радиотехника» как бакалавриат Иркутского национального исследовательского технического университета (2016 год), так и в 2018 году – магистратуру.

В период обучения Ле Куанг Туен интересовался проблемами приборостроения, радиотехники СВЧ и экспериментальной физики. В 2022 году Ле Куанг Туен успешно завершил обучение в аспирантуре ИРНИТУ по направлению подготовки 11.06.01 – «Электроника, радиотехника и системы

связи», направленность – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Обучаясь в аспирантуре, он выполнил и подготовил к защите диссертацию «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора».

Удостоверения о сдаче кандидатских экзаменов выданы: История и философия науки – 4 апреля 2019 г.; Иностранный (английский) язык – 12 апреля 2019 г.; Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения – 16 января 2021 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научным руководителем аспиранта Ле Куанг Туен является доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Восточно-Сибирского филиала ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» Егоров Виктор Николаевич, профессор (внешний совместитель) кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем Института высоких технологий ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Доклад Ле Куанг Туен по его диссертационной работе был заслушан и обсужден на заседании кафедры РЭиТС Института высоких технологий ИРНТУ с приглашением специалистов в области радиотехники, техники СВЧ, физики плазмы, приборов и методов экспериментальной физики из научно-исследовательских отделов ИВТ, института энергетики ИРНТУ, из ФГБОУ «Иркутский государственный университет». На заседании кафедры РЭиТС присутствовало 22 сотрудника, из них 6 докторов наук и 9 кандидатов наук: заведующий кафедрой РЭиТС, к.ф.-м.н., доцент А.Г. Ченский, д.ф.-м.н., профессор В.М. Бардаков, д.ф.-м.н., профессор Н.А. Строкин, д.ф.-м.н., в.н.с. В.Н. Егоров, д.х.н., профессор Л.О. Ниндакова, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» В.Л. Паперный, к.ф.-м.н., доцент Института энергетики ИРНТУ С.Д. Иванов, к.ф.-м.н., доцент Н.А. Иванов, к.ф.-м.н.,

доцент А.С. Полетаев, к.т.н., доцент Е.М. Фискин, к.т.н., доцент А.П. Демин, к.х.н., доцент Н.В. Леонова, к.х.н., доцент М.М. Фискина, к.х.н., доцент С.А. Скорникова, старший преподаватель Л.В. Просвирякова, старший преподаватель И.Г. Насникова, старший преподаватель А.А. Дмитриев, инженер-исследователь Д.А. Ченский, электроник Н.А. Губин, инженер-электроник Д.А. Токмачев, заведующий лабораторией Т.В. Шадрина, специалист по УМР В.С. Ильина.

Актуальность темы и направленность исследования

Резонансные устройства играют важную роль в экспериментальной физике и измерительной технике различных диапазонов частот. Основными характеристиками резонаторов являются резонансная частота и собственная добротность. В экспериментальной технике высокодобротные резонаторы обеспечивают высокую точность и чувствительность измерения различных величин, в частности, параметров слабопоглощающих диэлектриков.

Диэлектрики с малым поглощением энергии электромагнитных волн используются в качестве изоляции кабелей и элементов волноводных структур, радиопрозрачных окон, оболочек и антенных обтекателей. Характеристики радиочастотных коаксиальных кабелей существенно зависят от применяемого материала изоляции. Важными требованиями к диэлектрикам в кабелях и других СВЧ-устройствах являются невысокие значения относительной диэлектрической проницаемости и очень малые значения тангенса угла диэлектрических потерь. Наиболее точные исследования слабопоглощающих диэлектриков в диапазонах низких, высоких и сверхвысоких частот (НЧ, ВЧ, СВЧ) проводят резонансными методами с использованием измерительных преобразователей с сосредоточенными параметрами на НЧ и ВЧ и с распределенными параметрами на СВЧ.

В дециметровом диапазоне длин волн сложность таких исследований связана с необходимостью иметь измерительный резонатор с собственной добротностью $Q_0 \geq 5000$ и высоким коэффициентом заполнения резонатора исследуемым образцом приемлемых, предпочтительно стандартных, размеров.

Другая сложность связана с переходом от устройств и методов измерения на основе цепей с сосредоточенными параметрами R , L , C к методам СВЧ диапазона на основе устройств с распределенными параметрами. Теория измерительного резонатора и метода измерения в квазистационарном приближении не обеспечивает необходимой точности. Строгое электродинамическое рассмотрение имеет свои сложности и ограничения. Аналитические модели с представлением поля рядами по собственным функциям резонатора эффективны для резонаторов простых правильных форм в отсутствии изломов проводящих поверхностей в виде ребер (внешних углов). Численные методы моделирования в современных универсальных программных пакетах требуют значительных вычислительных ресурсов. Их возможности в расчете полей в узких щелях и зазорах неясны из-за сопоставимости размера зазора и шага сетки разбиения. И аналитические и численные методы в конкретной реализации требуют надежной экспериментальной оценки точности результатов расчета для эффективного практического использования резонаторов.

В дециметровом диапазоне электромагнитных волн одним из высокочастотных резонаторов является коаксиальный резонатор и его частный случай – коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью (КРУЕ) – зазором в центральном электроде. Он находит применение также в измерительной технике, в частности, в измерениях параметров радиоматериалов. Дециметровый диапазон волн для методов анализа радиотехнических устройств является переходным от квазистационарного рассмотрения цепей с сосредоточенными элементами к электродинамическому рассмотрению с многоволновым представлением поля и элементов с распределенными параметрами. Квазистационарное рассмотрение резонатора не обеспечивает необходимой точности при использовании резонатора в измерительных задачах. С другой стороны, возможности строгого электродинамического рассмотрения с многоволновым представлением поля в резонаторе ограничены сложной внутренней геометрией резонатора,

содержащей острые металлические и диэлектрические ребра, и сложной программной реализацией моделей. И в первом, и во втором случаях такое рассмотрение должно быть подтверждено прецизионными экспериментами, необходимыми для применения разработанных моделей в измерительных задачах.

Современные компьютерные программные пакеты численного моделирования СВЧ устройств и расчета электромагнитных полей обладают высокой универсальностью и пригодны для анализа различных электродинамических структур. Их реально достижимая точность в конкретных условиях требует надежной экспериментальной оценки. Получаемые численным моделированием взаимозависимости параметров и их конкретные значения могут быть использованы для аппроксимаций численных решений аналитическими выражениями в конкретных конструкциях резонаторов.

Таким образом, тема работы Ле Куанг Туен является актуальной и соответствует одному из направлений исследований в ИВТ ИРНИТУ и в ВСФ ФГУП «ВНИИФТРИ».

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации

Все выносимые на защиту результаты получены при непосредственном участии автора или лично автором. Автором, совместно с научным руководителем, проведено описание электромагнитного поля КРУЕ и метода расчета его резонансных характеристик. Автором написаны и протестированы программы для ЭВМ в среде Mathcad и Octave для расчета резонансных характеристик резонатора, проведено графическое и математическое моделирование КРУЕ в пакете CST Studio Suite 2017. Автором лично выяснена структура электромагнитного поля в КРУЕ и вид поверхности с нулевой радиальной электрической компонентой. Оценка влияния деформации упругой гофрированной стенки резонатора и различия расчетных и экспериментальных результатов также выполнены автором лично.

Постановка задач на проведение экспериментальных исследований, проведение измерений, анализ и обобщение экспериментальных данных выполнены совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. В.Н. Егоровым.

Степень достоверности результатов исследований проведенных соискателем ученой степени

Достоверность полученных соискателем результатов обеспечивается:

- выполнением экспериментов на установках, входящих в состав государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ110-2012 с подтвержденными метрологическими характеристиками;

- использованием методов теоретического анализа резонансных систем СВЧ и программ численного моделирования СВЧ устройств, широко применяемых в современной радиотехнике;

- положительной реакцией специалистов в данной области знаний, высказанной в рецензиях, /заключениях экспертизы, обсуждениях на конференциях и семинарах; материалы, представленные в диссертации, были доложены на конференциях: XV Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и связи» (Иркутск, 2016 г.), XX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, 2017 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Прикладные исследования в области физики» (Иркутск, 2021 г.);

- совпадением измеренных диэлектрических параметров образцов материалов с данными, аттестованными на государственном первичном эталоне ГЭТ 110-2012;

- совпадением полученных численных и экспериментальных результатов с результатами строгих аналитических моделей в предельных случаях.

Новизна результатов, проведенных соискателем ученой степени исследований

1. Впервые показано, что на основном колебании двойного КРУЕ в области межэлектродного зазора существует параллельная торцевым плоскостям поверхность, на которой радиальная компонента электрического поля обращается в нуль $E_r = 0$. По этой поверхности двойной КРУЕ может быть разделен на два одинарных резонатора и представлен в виде двух одинарных КРУЕ с одинаковой резонансной частотой, равной частоте исходного резонатора.

2. Предложена и экспериментально реализована конструкция перестраиваемого измерительного КРУЕ с изменением межэлектродного зазора за счет прогиба торцевой стенки-мембраны. Новизна разработанной конструкции подтверждена патентом Российской Федерации на изобретение. Преимуществами данного резонатора являются высокая добротность и широкий диапазон перестройки резонансной частоты за счет изменения зазора от замыкания электродов (нулевого зазора) до 5,2 мм и его измерение с разрешением 1 мкм.

3. Разработан новый способ определения точных внутренних размеров полых резонаторов на основе исследования их спектра резонансных частот. Способ применен для определения точных внутренних размеров разработанного измерительного КРУЕ, необходимых для оценки точности расчетных моделей резонатора.

4. Получены экспериментальные и расчетные зависимости смещения резонансной частоты разработанного КРУЕ от диэлектрической проницаемости, толщины измеряемого образца и других параметров диэлектрического включения в зазоре КРУЕ.

5. Найден обобщенный безразмерный параметр $x(\varepsilon, t_\varepsilon, t)$, определяющий относительный сдвиг резонансной частоты разработанного КРУЕ $\delta f(x)$ как функцию одной переменной x , что понижает размерность задачи расчета параметров диэлектрика в зазоре КРУЕ по смещению резонансной частоты.

Предложены аппроксимирующие функции для $\delta f(x)$ и методика диэлектрических измерений в КРУЕ.

Практическая значимость исследований, проведенных соискателем ученой степени

Получены новые данные по распределению электромагнитного поля в двойном КРУЕ без диэлектрического образца и с образцом, дающие основания для выбора наиболее подходящих собственных функций в аналитическом описании КРУЕ.

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 образцов в разработанном КРУЕ по относительному уходу резонансной частоты и изменению добротности после ввода образца в резонатор. Вид аппроксимирующей функции пригоден для применения в КРУЕ других размеров.

Разработанный и зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности как изобретение коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором имеет собственную добротность 7400 на частоте 650 МГц и позволяет проводить наиболее точные измерения диэлектрических параметров слабопоглощающих диэлектриков в дециметровом диапазоне волн. Резонатор планируется к включению в состав Государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012 для расширения его частотного диапазона в область дециметровых волн. Точность результатов измерения в разработанном резонаторе удовлетворяет требованиям по метрологическим характеристикам ГЭТ.

Установка с коаксиальным резонатором данного типа и разработанная автором экспериментально-аналитическая модель резонатора используются также в Особом конструкторском бюро кабельной промышленности (АО «ОКБ

КП», г. Мытищи) при входном контроле материалов изоляции радиочастотных кабелей.

Разработанная компьютерная программа расчета резонансной частоты двойного коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью позволяет точно определить положение «электрической стенки» в зазоре двойного КРУЕ с заданными размерами и резонансную частоту этого резонатора. Программа зарегистрирована в Федеральной службе РФ по интеллектуальной собственности.

Результаты диссертационного исследования автора используются в работах по развитию государственного первичного эталона единиц комплексной диэлектрической проницаемости ГЭТ 110-2012, что подтверждается Актом. Разработанная автором программа для ЭВМ зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Ценность научных работ соискателя ученой степени

Ценность научных работ соискателя ученой степени определяется их вкладом в разработку проблемы высокоточного экспериментального исследования слабопоглощающих диэлектриков в дециметровом диапазоне электромагнитных волн и отражена в публикациях Ле Куанг Туен по теме диссертации. Большинство из полученных результатов являются новыми, соответствующими мировому уровню.

Научная специальность, которой соответствует диссертация

На основании анализа предмета исследования, характера полученных результатов, направленности исследований сделано заключение о том, что название и содержание диссертационной работы «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора» Ле Куанг Туен соответствуют направлению подготовки 2.2. – «Электроника, фотоника, приборостроение и связь», специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»: пункты 1, 7 Паспорта специальности.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

Изложенные в диссертации результаты в полном объеме содержатся в 11-ти опубликованных работах соискателя:

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Егоров В.Н., Зуев Я.О., Костромин В.В., Ле Куанг Туен, Романов Б.С. Измерение малых диэлектрических потерь полимерных материалов в дециметровом диапазоне волн // Кабели и провода, 2017. – Т. 368, № 6. – С. 12-14.

2. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю., Ле Куанг Туен. Измерение внутренних размеров сверхвысокочастотных объёмных резонаторов // Измерительная техника, 2020. – №10. – С. 65-72.

3. Егоров В.Н., Ле Куанг Туен. Новый подход к расчету коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью // Известия ВУЗов. Физика, 2021. – Т. 64, № 6 (763). – С. 164-169.

4. Егоров В.Н., Ле Куанг Туен. Численное и экспериментальное исследование коаксиального резонатора с измерительным зазором // Радиотехника, 2022. – Т.86, № 6. – С. 141-150.

Публикации в других изданиях

5. Egorov V.N., Tokareva E.Yu. & Tuyen, L. Q. Measurement of the Inner Dimensions of Microwave Cavity Resonators // Measurement Techniques, 2021. – V. 63. – P. 839-847.

6. V.N. Egorov and Le Quang Tuyen. New approach to calculating the double coaxial resonator with a shortening capacitance // Russian Physics Journal, 2021. – V. 64, No. 6. – P. 1153-1159.

7. Ле Куанг Туен, Егоров В.Н. Коаксиальный резонатор с укорачивающей емкостью // Современные проблемы радиоэлектроники и связи. Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Иркутск, 19 мая 2016 г., Иркутск: Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, 2016. – С. 167-174.

8. Ле Куанг Туен. Исследование коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью // Современные проблемы радиоэлектроники. XX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Красноярск, 4-5 Мая 2017 г. Сборник научных трудов. – С. 375-379.

9. Ле Куанг Туен, Егоров В.Н. Измерительный коаксиальный резонатор дециметрового диапазона электромагнитных волн для исследования диэлектриков // Всероссийская научно-практическая конференция «Прикладные исследования в области физики» Иркутск, 10 Марта 2021 г. Сборник статей. – С. 65-71.

10. Егоров В.Н., Ле Куанг Туен. Коаксиальный измерительный резонатор с цилиндрическим электродом и регулируемым емкостным зазором // Патент на изобретение № RU 2680109. – Оpubл. 15.02.2019 г. – Бюллетень №5.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619275 Программа расчета резонансной частоты несимметричного коаксиального резонатора с укорачивающей емкостью. Авторы Ле Куанг Туен, Егоров В. Н. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 08 марта 2021 года.

ПОСТАНОВИЛИ:

Диссертация «Экспериментально-аналитическая модель измерительного коаксиального резонатора» Ле Куанг Туен рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по направлению подготовки 2.2. – «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» по специальности 2.2.14 – «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Заключение принято на заседании кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем института высоких технологий ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», на которое были приглашены специалисты в области радиотехники, техники СВЧ, физики плазмы, приборов и методов экспериментальной физики из научно-исследовательских отделов ИВТ, института энергетики ИРННТУ и ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет».

На заседании присутствовали 22 человека.

Результаты голосования: «за» – 22 человека; «против» – нет;
«воздержались» – нет.

Протокол №1 от 19 сентября 2022 года.

Председатель

заведующий кафедрой РЭиТС
ИВТ ИРНИТУ кандидат физико-
математических наук, доцент



Ченский А.Г.

Секретарь



Шадрина Т.В.