

Пихтелев Николай Александрович

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
РЕЗОНАТОРЫ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

05.12.07- Антенны, СВЧ устройства и их технологии

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

Пихтелев

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2005

Работа выполнена в Нижегородском научно-исследовательском приборостроительном институте

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Белов Ю.Г.

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент
Андреев И.Л.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Орлов О.С.,

кандидат технических наук
Налькин М.Е.

Ведущая организация-

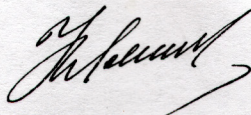
Научно-исследовательский институт измерительных систем,
г. Н. Новгород.

Защита состоится 2 июня 2005г. в 15 часов на заседании специализированного Совета Д 212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете по адресу: 603600, г. Н. Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ.

Автореферат разослан _____ 2005г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



В.А. Калмык

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка строгих методов расчета СВЧ-устройств [Л.1–Л.3] является важнейшим направлением современной прикладной электродинамики. Необходимость разработки таких методов обусловлена постоянным усложнением конструкций СВЧ-устройств и широким внедрением их в радиоэлектронную аппаратуру различного назначения [Л.4–Л.6]. В этой аппаратуре широкое применение находят [Л.4, Л.7–Л.9] металлодиэлектрические резонаторы (МДР). Неоднородное диэлектрическое заполнение таких резонаторов расширяет функциональное назначение созданных на их основе СВЧ-устройств, позволяет уменьшить их размеры и улучшить технические характеристики.

Важным направлением использования МДР является их применение в установках для физических исследований, для контроля и измерения параметров различных веществ. В настоящее время разрабатываются микроволновые измерители параметров нефти и природного газа [Л.10, Л.11]. В связи с этим большой практический интерес представляет применение частично заполненного МДР в качестве датчика температуры «точки росы» (ТТР) в микроволновом измерителе влажности газа [Л.5].

При измерении параметров диэлектриков резонансным методом [Л.9, Л.12] МДР используются в составе установок в качестве измерительных резонансных ячеек. Обычно изготавливается образец диэлектрика специальной формы, который помещается в резонансную полость. Проводятся измерения резонансной частоты и добротности резонатора, по данным которых расчетным путем определяются параметры диэлектрика (относительная диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$). Однако изготовление образца диэлектрика определенной формы не всегда возможно или нежелательно (в частности, если требуется определение параметров листовых диэлектриков с геометрическими размерами, существенно превышающими размеры резонансной ячейки). В этом случае используются так называемые «неразрушающие» измерения [Л.13], при которых не требуется изготовления образца специальной формы.

Еще одним важным практическим применением МДР является их использование [Л.4, Л.14] в качестве колебательных систем дискриминаторов квантовых стандартов частоты и времени (КСЧ). Для обеспечения высокой стабильности частоты рубидиевого стандарта частоты (РСЧ) требуется обеспечить стабильность частоты

входящего в его состав СВЧ резонатора и необходимое количество металлического рубидия в ячейке РСЧ. Указанные задачи могут быть решены с использованием неоднородно заполненных МДР. В частности, используя МДР, можно контролировать бесконтактным способом количество рубидия в ячейке РСЧ в процессе изготовления рубидиевого дискриминатора.

При использовании МДР для физических исследований определяемые величины находятся вычислительным путем, поэтому точность определения этих величин зависит от строгости применяемых методов расчета и степени учета конструктивных особенностей резонаторов. Таким образом, расчет и исследование характеристик МДР, применяющихся в качестве чувствительных резонансных ячеек или микроволновых датчиков в аппаратуре для физических исследований, с использованием строгих и обоснованных методов расчета и создание на основе этих методов быстродействующих и эффективных алгоритмов и программ является актуальной проблемой.

Цель диссертации – разработка (на основе строгих и обоснованных методов) эффективных быстродействующих алгоритмов и программ расчета характеристик цилиндрических металлодиэлектрических резонаторов, использующихся в аппаратуре для физических исследований (датчике температуры «точки росы» (ТТР), установках для измерения параметров диэлектриков и определения количества рубидия в ячейке РСЧ), а также оптимизация параметров указанных выше МДР для улучшения технических характеристик созданных на их основе приборов и установок.

Для достижения указанной выше цели в диссертации проводится электродинамическое исследование ряда конструкций МДР, схематически показанных на рис. 1–3.

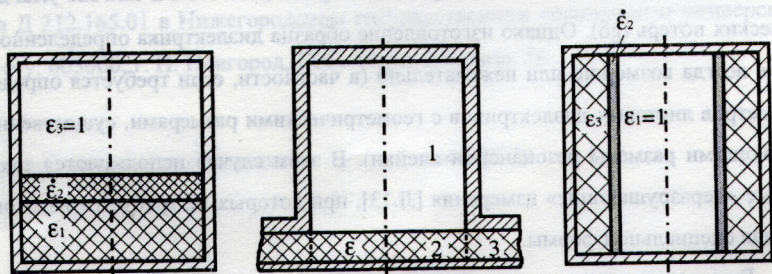


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Первая из указанных конструкций, рис. 1, используется [Л.5] в микроволновом измерителе влажности газа и представляет собой цилиндрический волноводный резонатор.

натор с диэлектрической пластиной, расположенной вблизи одного из его торцов (ϵ_1 – относительная диэлектрическая проницаемость пластины). В резонаторе возбуждается симметричное магнитное колебание, близкое по структуре к колебанию H_{011} поло-го цилиндрического резонатора. С помощью микрохолодильника-нагревателя темпе-ратуру пластины можно изменять в широких пределах. Через резонатор прокачивается исследуемый газ. При достижении пластиной температуры, соответствующей ТТР, на ее поверхности, обращенной внутрь резонатора, конденсируется пленка воды или жидких высших углеводов (ϵ_2 – комплексная диэлектрическая проницаемость пленки). Значение температуры пластины, соответствующее моменту выпадения пленки (который индицируется по сдвигу резонансной частоты и изменению добротности резонатора), позволяет при известном давлении газа определить с помощью термодинамических методов его влажность. Таким образом, для определения влаж-ности газа не требуется рассчитывать характеристики резонатора. Однако их расчет необходим для оптимизации геометрических размеров датчика ТТР с целью повыше-ния его чувствительности. Датчик ТТР [Л.5], работающий в КВЧ-диапазоне, имеет малые геометрические размеры, что существенно усложняет его экспериментальную доводку. Поэтому строгое электродинамическое исследование резонатора датчика ТТР и расчет его основных характеристик имеют большое практическое значение.

Частным случаем конструкции МДР, рис. 1, при $\epsilon_2 = 1$ является исследуемый в диссертации цилиндрический резонатор с диэлектрической вставкой. Такая конст-рукция описана в известной литературе [Л.9, Л.12] и применяется, в частности, при измерении параметров диэлектриков. Как отмечалось, обычно ϵ и $\text{tg}\delta$ диэлектриков определяются по измеренным значениям резонансной частоты и добротности. Одна-ко, при высоком уровне потерь в диэлектрике измерения последнего параметра ока-зываются затруднительными и имеют невысокую точность. В связи с этим представ-ляет интерес разработка новых подходов, позволяющих с помощью указанной выше резонансной ячейки измерять параметры поглощающих диэлектриков. В диссертации предлагается способ определения параметров диэлектриков со сравнительно высоким уровнем потерь по значениям резонансных частот полностью и частично заполнен-ных исследуемым диэлектриком резонаторов.

Вторая конструкция, рис. 2, используемая для «неразрушающих» измерений параметров листовых диэлектриков, представляет собой цилиндрический волновод-

ный резонатор, один из торцов которого закрыт диэлектрической пластиной. С внешней стороны пластины расположен экран. Края пластины выходят за пределы резонансного объема. В резонаторе возбуждается симметричное магнитное колебание, близкое по структуре к колебанию H_{011} цилиндрического волноводного резонатора. Для повышения точности измерений необходимо минимизировать ошибки, вносимые расчетным алгоритмом. В связи с этим представляет интерес разработка алгоритма, позволяющего учесть конструктивные особенности измерительной ячейки, рис. 2. Конструкция МДР, аналогичная приведенной на рис. 2, в известной литературе по исследованию параметров материалов на СВЧ не рассматривалась.

Третья конструкция, рис. 3 – это объемный цилиндрический резонатор с диэлектрической втулкой (стеклянной ячейкой), аналогичный резонатору рубидиевого стандарта частоты. На внутреннюю поверхность втулки напылена пленка металла (в РСЧ – рубидия). Такой МДР можно использовать для определения количества рубидия в ячейке РСЧ путем определения толщины рубидиевой пленки. В диссертации конструкцию, рис. 3, предлагается исследовать – с наиболее общих позиций – как трехслойный МДР, в котором металлическая пленка рассматривается как слой диэлектрика с комплексной диэлектрической проницаемостью, мнимая часть которой значительно превышает действительную. Конструкция трехслойного резонатора, рис.3, рассматривалась в литературе [Л.9, Л.15], однако при этом все слои являлись идеальными диэлектриками.

Поскольку в МДР, рис. 3, металлическая пленка очень тонкая (ее толщина много меньше толщины скин-слоя), расчет характеристик этого резонатора можно производить как методом частичных областей (МЧО), так и методом поверхностного тока (МПТ) [Л.16–Л.18]. Представляет интерес получить характеристическое уравнение резонатора, рис. 3, обоими методами (МЧО и МПТ) и сопоставить полученные результаты.

Методы исследования. Основные результаты теоретических исследований, представленные в диссертации, получены на основе строгого электродинамического метода – метода частичных областей (МЧО). Причем при расчете рассматриваемых в диссертации электродинамических структур использовались различные модификации МЧО (МЧО с дискретным набором собственных функций, МЧО с непрерывным спектром собственных функций), отличающиеся способами разбиения исследуемых резонаторов на частичные области и процедурами «сшивания» полей на границах

раздела. Кроме того, расчет характеристик МДР с пленкой рубидия осуществлялся как методом частичных областей, так и методом поверхностного тока (МПТ).

Научная новизна. В результате выполнения работы:

- На основе МЧО разработаны математические модели ряда конкретных конструкций МДР, используемых в аппаратуре для физических исследований, а именно: в микроволновом датчике ТТР и установках для измерения параметров диэлектриков и определения количества рубидия в ячейке РСЧ.
- Разработан алгоритм расчета характеристик (резонансной частоты и добротности) резонатора датчика ТТР с учетом поглощающей пленки, осаждающейся на поверхности диэлектрической пластины. Исследовано влияние пленки на характеристики и распределение поля в резонаторе.
- Разработан алгоритм расчета параметров диэлектриков с потерями по известным значениям резонансных частот полностью и частично заполненных исследуемым диэлектриком резонаторов.
- Развита метод частичных областей с непрерывным спектром собственных функций, а именно: разработан новый вариант метода выделения «доминирующей части» непрерывного спектра, основанный на использовании априорной информации о геометрии резонансной ячейки.
- На основе двух методов – МЧО и МПТ – получены характеристические уравнения резонатора с диэлектрической втулкой и металлической пленкой на ее внутренней поверхности. Показано, что при малой толщине пленки и ее высокой проводимости эти уравнения приводят к одинаковым результатам.
- Теоретически исследованы факторы, влияющие на частоту рубидиевого стандарта, к которым относятся параметры СВЧ резонатора РСЧ и изменение со временем количества металлического рубидия в ячейке РСЧ. Определены и указаны способы снижения этого влияния.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке алгоритмов и программ, позволяющих производить расчет и оптимизацию технических характеристик датчика температуры «точки росы»;
- в разработке алгоритмов и программ для расчета и оптимизации характеристик резонансных ячеек, используемых для измерения параметров диэлектриков;
- в разработке способа определения и методики измерений параметров диэлектриков с большими потерями на СВЧ и алгоритма их (параметров) расчета по

известным значениям резонансных частот полностью и частично заполненных исследуемым диэлектриком резонаторов;

- в разработке способа определения и методики «неразрушающих» измерений параметров листовых диэлектриков на СВЧ и алгоритма их расчета по измеренным значениям резонансной частоты и добротности;
- в разработке способа определения количества рубидия в ячейке РСЧ;
- в исследовании факторов, влияющих на частоту РСЧ и определении путей снижения этого влияния.
- в выборе оптимальных параметров исследуемых МДР.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- использованием теоретически обоснованных методов расчета;
- контролем результатов путем проверки выполнения предельных переходов и исследования внутренней сходимости решений;
- сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными.

Реализация и внедрение результатов. Результаты, полученные при выполнении диссертации, внедрены в Научно-исследовательском институте измерительных систем и Нижегородском научно-исследовательском приборостроительном институте. В Научно-исследовательском институте измерительных систем при разработке микроволнового измерителя влажности газа внедрены результаты теоретического исследования его чувствительного элемента – резонансного датчика температуры «точки росы». В Нижегородском научно-исследовательском приборостроительном институте внедрены результаты исследования МДР для рубидиевого стандарта частоты, результаты теоретического анализа физических эффектов в РСЧ, а также результаты исследования факторов, влияющих на частоту РСЧ и способы снижения этого влияния.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 23 печатные работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на III международном симпозиуме «Биофизика полей и излучений и биоинформатика» в г. Тула (2000 г.); на I, II и III международных научно-технических конференциях (НТК) «Физика и технические приложения волновых процессов» в г. Самаре и г. Волгограде (2001, 2003, 2004 г.г.); на V и VII Всероссийских НТК «Методы и средства измерения физических величин», г. Н. Новгород (2000, 2003 г.г.); на Всероссийской НТК «Информационные системы и технологии», посвященной 65-ти летию факультета ин-

формационных систем и технологий НГТУ, г. Н. Новгород (2001 г.); на III и IV Всероссийских НТК «Информационные системы и технологии», г. Н. Новгород (2003, 2004 г.г.); на НТК факультета информационных систем и технологий НГТУ, г.Н. Новгород (2000, 2002 г.г.); на региональном молодежном научно-техническом форуме «Будущее технической науки Нижегородского региона» в г. Н. Новгороде (2002 г.); на II региональной молодежной НТК «Будущее технической науки Нижегородского региона», г. Н. Новгород (2003 г.); на IX Нижегородской сессии молодых ученых и специалистов в с/п «Голубая Ока» (2004 г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм, результаты расчета и исследования основных технических характеристик резонатора датчика температуры «точки росы».
2. Результаты расчета и исследования электрических характеристик резонансной ячейки для измерения параметров диэлектриков с большим уровнем потерь. Алгоритм расчета параметров диэлектриков по значениям резонансных частот полностью и частично заполненных исследуемым диэлектриком резонаторов.
3. Алгоритм, результаты расчета и исследования электрических характеристик резонансной ячейки для измерения параметров листовых диэлектриков.
4. Алгоритм и результаты расчета характеристик резонатора для определения количества рубидия в ячейке рубидиевого стандарта частоты.
5. Результаты исследования факторов, влияющих на частоту РСЧ и пути снижения этого влияния.

Объем и структура диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 126 страниц основного текста, 11 страниц списка литературы (115 наименований), 39 рисунков, 10 таблиц, 5 страниц приложений, содержащих 2 акта внедрения результатов диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется цель диссертационной работы, обосновывается ее актуальность, на основании обзора литературы ставятся задачи исследования, определяется новизна полученных результатов и их практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание диссертации.

Первая и вторая главы диссертации посвящены исследованию резонатора, рис. 1, используемого в микроволновом измерителе влажности газа в качестве датчика ТТР. Исследование резонатора датчика ТТР производится в два этапа.

В первой главе (на первом этапе исследования) датчик рассматривается как цилиндрический волноводный резонатор с диэлектрической пластиной вблизи одного из торцов. При этом пленка воды или высших углеводов (ВУ), осаждающаяся на поверхности пластины, не учитывается. Исследование данного МДР, производимое с помощью МЧО, не представляет значительных трудностей. Однако большое значение имеет решение ряда практических задач, связанных с особенностями применения данного резонатора в составе датчика ТТР. В главе разработан алгоритм расчета характеристик резонатора (резонансной частоты f_p и добротности Q), с помощью которого исследованы их зависимости от толщины диэлектрической пластины. В результате данного исследования определены геометрические размеры резонатора и толщина диэлектрической (поликоровой или кварцевой) пластины, обеспечивающие требуемую рабочую частоту датчика ТТР $f_p = 35$ ГГц и одномодовый режим работы в диапазоне частот $f_p \pm 350$ МГц.

Для обеспечения высокой чувствительности датчика ТТР было исследовано распределение электрического поля в резонаторе датчика и определено оптимальное значение толщины диэлектрической пластины, при котором достигается максимальная амплитуда поля вблизи поверхности диэлектрической пластины, обращенной внутрь резонатора (то есть в месте осаждения пленки воды или ВУ). Поскольку на рабочую частоту датчика ТТР оказывают существенное влияние температура диэлектрической пластины и давление заполняющего резонатор газа, которые в реальных условиях эксплуатации датчика изменяются в широких пределах [Л.5], была произведена оценка указанного влияния. Определено, что максимальное изменение частоты резонатора датчика ТТР (при максимально возможном изменении давления газа и температуры пластины) лежит в диапазоне частот $f_p \pm 350$ МГц.

Во второй главе (на втором этапе) исследовалось влияние пленки воды или ВУ на резонансную частоту, добротность и распределение поля в резонаторе датчика ТТР. В данной главе с использованием МЧО составлено комплексное характеристическое уравнение резонатора, рис. 1. Разработаны алгоритм и программа расчета f_p и Q резонатора датчика ТТР с учетом поглощающей пленки на поверхности диэлектри-

ческой пластины. Рассчитаны резонансная частота и добротность резонатора для пленки воды и пленки ВУ. Определено, что выпадение пленки ВУ удобнее индцировать по сдвигу резонансной частоты, а пленки воды – по резкому снижению добротности резонатора. Исследовано влияние поглощающей пленки на распределение электрического поля в резонаторе датчика ТТР. Результаты данного исследования показали, что выпадение пленки воды или ВУ не вызывает существенного перераспределения электрического поля в резонаторе. Поэтому определенные ранее (без учета поглощающей пленки) значения толщины поликоровой или кварцевой пластин остаются оптимальными и при наличии пленки.

В третьей главе применительно к резонансной ячейке, которую предлагается использовать для измерения параметров диэлектриков с большими потерями, на основе МЧО составлено комплексное характеристическое уравнение цилиндрического резонатора с диэлектрической вставкой. С помощью этого уравнения рассчитаны значения резонансных частот резонатора и добротности, обусловленной потерями в диэлектрике. Описан алгоритм расчета параметров диэлектриков с большим уровнем потерь по значениям резонансных частот полностью и частично заполненных исследуемым диэлектриком резонаторов. Приведены результаты расчета, полученные с использованием разработанного алгоритма и численного моделирования процесса измерений. Отмечено, что предложенный алгоритм определения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ может быть рекомендован при исследовании материалов со сравнительно высоким уровнем потерь ($\text{tg}\delta > 0,05$) и небольшой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon < 15$).

Кроме того, в данной главе на основе МЧО составлено характеристическое уравнение цилиндрического резонатора с диэлектрической пластиной и кольцевой щелью в экране, рис. 2. Эта щель является запредельной на рабочей частоте резонатора. Особенность математической модели данного МДР состоит в том, что на границах области 2, рис. 2, отсутствуют граничные условия, соответствующие краевой задаче Штурма-Лиувилля. Поэтому строгое решение задачи требует представления поля в этой области в виде непрерывного спектра собственных функций (НССФ) [Л.19–Л.21]. Записывая условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на границах областей 1 и 2, 2 и 3 и применяя стандартную процедуру МЧО, получаем систему интегральных уравнений (СИУ) относительно

но неизвестной спектральной функции $B(\alpha)$ (α – поперечное волновое число в области 2), которая является аналогом неизвестных амплитудных коэффициентов в представлениях полей дискретными наборами собственных функций (СФ).

Решение полученной СИУ производилось с помощью метода выделения «доминирующей части» непрерывного спектра (НС), впервые предложенного в работе [Л.21]. В этой работе для алгебраизации СИУ использовался дискретный набор спектральных составляющих, эквидистантно расположенных вдоль оси продольного волнового числа с неизвестным пространственным периодом, значение которого определялось в процессе решения задачи совместно с резонансной частотой резонатора. В диссертации для решения СИУ предложен новый вариант метода выделения «доминирующей части» НС, основанный на использовании дополнительной априорной информации о геометрии резонансной ячейки.

Показано, что разработанный на основе МЧО с НССФ алгоритм расчета характеристик МДР, рис. 2, обладает хорошей внутренней сходимостью. С его использованием была рассчитана резонансная частота резонатора, рис. 2. Результаты расчета показали, что при малой толщине диэлектрической пластины, в качестве материала которой рассматривался поликор, кольцевая щель в экране МДР, рис. 2, слабо влияет на резонансную частоту.

Конструкцию МДР, изображенную на рис. 2, в диссертации предлагается использовать для «неразрушающих» измерений параметров листовых диэлектрических материалов. Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований измерительной ячейки на основе этого МДР, для определения ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ листовых диэлектриков по измеренным значениям f_p и Q можно использовать более простой алгоритм – для экранированного резонатора без учета кольцевой щели. В главе представлены результаты экспериментального определения параметров ряда образцов листовых диэлектриков (ФФ-4, ФАФ-4, ФЛАН-2,8, ФЛАН-5 и СТ-3). Полученные значения ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ образцов хорошо согласуются со справочными данными. Для рассмотренной измерительной ячейки произведена оценка влияния неточности определения толщины образца диэлектрика на погрешность измерений ϵ диэлектрика.

В четвертой главе приведены результаты исследования цилиндрического резонатора со стеклянной втулкой и тонкой рубидиевой пленкой, рис. 3. В диссертации исследование этого МДР производится двумя методами: МЧО и МПТ. При использо-

вании МЧО пленка рассматривается как диэлектрический слой с комплексной проницаемостью ϵ_2 , мнимая часть которой пропорциональна проводимости σ металла пленки. Показано, что при сравнительно большой величине σ (это хорошо выполняется для рубидия) характеристические уравнения, полученные обоими методами, дают одинаковые результаты. Однако на основе МПТ получается более простой алгоритм расчета характеристик МДР, рис. 3. Поэтому для расчета характеристик резонатора, рис. 3, в диссертации был использован метод поверхностного тока.

Описаны алгоритм и программа расчета электрических характеристик МДР, рис. 3. Представлены результаты расчета комплексного волнового числа $k = k' + i k''$, действительная часть которого пропорциональна резонансной частоте резонатора, а мнимая – определяет добротность резонатора, обусловленную потерями в пленке. Предложен способ определения количества рубидия в ячейке РСЧ по измеренному значению резонансной частоты МДР, рис. 3. Дополнительно в главе 4 представлены результаты исследования влияния параметров СВЧ резонатора РСЧ на рабочую частоту рубидиевого стандарта (это влияние обусловлено явлением «затягивания» частоты [Л.14]). Кроме того приведены результаты исследования влияния изменения количества металлического рубидия в ячейке РСЧ (вследствие взаимодействия рубидия со стенками ячейки РСЧ) на частоту стандарта. Предложены способы снижения указанных влияний.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в процессе работы.

В приложениях приведены выражения для функций, входящих в характеристическое уравнение резонатора, используемого для измерения параметров диэлектриков с большими потерями, а также акты внедрения результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Перечислим основные результаты, полученные в процессе выполнения диссертации:

1. На основе МЧО построена электродинамическая модель МДР, используемого в качестве чувствительного элемента в датчике ТТР. Разработаны алгоритм и программа расчета электрических характеристик (резонансной частоты и добротности) данного МДР. Произведен расчет резонансной частоты, добротности и распределения поля в указанном резонаторе. Исследованы зависимости резонансной

- частоты и добротности от толщины диэлектрической пластины и геометрических размеров резонатора; определены размеры резонатора и пластины, обеспечивающие требуемое значение резонансной частоты $f_p = 35$ ГГц и высокую чувствительность датчика ТТР. Показано, что изменение в широких пределах температуры диэлектрической пластины и давления газа не приводят к существенному изменению резонансной частоты МДР.
2. Исследовано влияние пленок воды или ВУ, осаждающихся на поверхности диэлектрической пластины, на резонансную частоту, добротность и распределение поля в резонаторе датчика ТТР. Определено, что момент осаждения пленки воды удобнее индцировать по резкому изменению добротности резонатора, а пленки ВУ – по сдвигу резонансной частоты. Результаты этих исследований были использованы при разработке алгоритма работы датчика ТТР.
 3. С использованием МЧО разработаны алгоритм и программа расчета электрических характеристик цилиндрического МДР, предназначенного для измерения параметров диэлектриков с большим уровнем потерь. Разработан алгоритм расчета параметров диэлектриков по значениям резонансных частот полностью и частично заполненных исследуемым диэлектриком резонаторов. Произведено численное моделирование процесса измерений. Определено, что разработанный алгоритм может быть использован при исследовании материалов со сравнительно высоким уровнем потерь ($\text{tg}\delta > 0,05$) и небольшой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon < 15$).
 4. Для резонатора с диэлектрической пластиной и кольцевой щелью в экране на основе МЧО с непрерывным спектром собственных функций составлена система интегральных уравнений. Для решения полученной СИУ (и, соответственно, для расчета характеристик МДР) предложен новый вариант метода выделения «доминирующей части» непрерывного спектра, основанный на использовании дополнительной априорной информации о геометрии резонатора. Расчет резонансной частоты рабочего колебания и амплитуд выделенных гармоник непрерывного спектра показал устойчивость разработанного алгоритма.
 5. Проведено экспериментальное исследование резонансной ячейки для «неразрушающих» измерений параметров листовых диэлектриков (МДР с кольцевой щелью). Теоретически и экспериментально обоснована возможность использования для определения параметров диэлектриков расчетного алгоритма, составленного

- для более простой электродинамической модели – экранированного МДР. Результаты экспериментального определения ϵ и $\text{tg}\delta$ ряда образцов диэлектрических материалов хорошо согласуются со справочными данными. Приведены оценки погрешности определения ϵ диэлектрика, связанные с погрешностью измерения толщины образца.
6. С использованием двух методов – МЧО и МПТ – составлены комплексные характеристические уравнения цилиндрического МДР со стеклянной втулкой и пленкой рубидия на ее внутренней поверхности, который предлагается использовать для определения количества рубидия в ячейке рубидиевого стандарта частоты. Определено, что для данного МДР характеристические уравнения, полученные обоими методами, дают одинаковые результаты.
 7. Для указанного МДР разработаны алгоритм и программа расчета электрических характеристик (резонансной частоты и добротности, обусловленной потерями в пленке). Исследованы зависимости этих характеристик от толщины стенок втулки, параметров ее материала (относительной диэлектрической проницаемости ϵ), а также проводимости металла пленки σ .
 8. Теоретически исследованы факторы, влияющие на частоту РСЧ. Определено, что к таким факторам относятся характеристики СВЧ резонатора рубидиевого стандарта и параметры металлического рубидия, находящегося в ячейке РСЧ. Указаны способы снижения этого влияния.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Микроволновый датчик температуры точки росы // Вестник новых медицинских технологий. Приложение: Материалы третьего международного симпозиума «Биофизика полей и излучений и биоинформатика» – Тула, 2000. – Т. VII – № 3–4. – С. 30.
2. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Расчет характеристик микроволнового датчика температуры точки росы // Научно-техническая конференция факультета информационных систем и технологий. Тезисы докладов – Н. Новгород: НГТУ, 2000. – С. 44.
3. Белов Ю.Г., Бирюков В.В., Пихтелев Н.А. Расчет добротности цилиндрического резонатора с диэлектрической пластиной // Научно-техническая конференция фа-

- культета информационных систем и технологий. Тезисы докладов–Н. Новгород: НГТУ, 2000. – С.43.
4. Белов Ю.Г., Золин А.Н., Пихтелев Н.А. Расчет СВЧ резонатора для датчика температуры точки росы // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2000 – Т.3. – С.38–42.
 5. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Электродинамическое исследование датчика температуры точки росы // Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства. Межвузовский сборник научных трудов. Вып.6 – Н. Новгород: НГТУ, 2000 – С.65–73
 6. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Исследование резонансного датчика температуры точки росы для микроволнового измерителя влажности газа // Методы и средства измерений физических величин: Тезисы докладов V Всероссийской научно-технической конференции в 4 частях. Н. Новгород: НГТУ, 2000. – Ч.1 – С.6
 7. Белов Ю.Г., Калмык В.А., Пихтелев Н.А. Расчет датчика температуры «точки росы» на базе неоднородно заполненного цилиндрического резонатора // Физика и технические приложения волновых процессов. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы»: Тезисы докладов I Международной НТК. Т. 1. – Самара, 2001. – С. 140 – 141.
 8. Белов Ю.Г., Бирюков В.В., Пихтелев Н.А. Расчет двухслойного цилиндрического резонатора с поглощающей пленкой между слоями// Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии», посвященная 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ. Тезисы докладов –Н. Новгород: НГТУ, 2001. – С.52.
 9. Бирюков В.В. Пихтелев Н.А. Малошумящий СВЧ-генератор на диэлектрическом резонаторе // Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии», посвященная 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ. Тезисы докладов–Н.Новгород: НГТУ, 2001.–С.55.
 10. Бирюков В.В. Пихтелев Н.А. Стабильный генератор на диэлектрическом резонаторе // Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии», посвященная 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ. Тезисы докладов – Н. Новгород: НГТУ, 2001. – С.55.

11. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Исследование распределения электромагнитного поля в двухслойном цилиндрическом резонаторе с поглощающей пленкой между слоями// Научно-техническая конференция факультета информационных систем и технологий. Тезисы докладов – Н. Новгород: НГТУ, 2002. – С.45.
12. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Расчет добротности симметричного магнитного колебания в резонаторе с диэлектрической пластиной// Вестник ВВО АТН РФ. Сер. Высокие технологии в радиоэлектронике, 2002. – № 1. – С. 54–58
13. Пихтелев Н.А. Микроволновый датчик для измерителя влажности газа// Региональный молодежный научно-технический форум «Будущее технической науки Нижегородского региона». Тезисы докладов. – Н. Новгород: НГТУ, 2002 – С. 52.
14. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Расчет и исследование характеристик микроволнового датчика температуры «точки росы» // Датчики и системы, 2003. – № 3.–С.43–46.
15. Пихтелев Н.А. Исследование цилиндрического резонатора с диэлектрической пластиной.// II Региональная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки Нижегородского региона». Тезисы докладов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003. – С. 40.
16. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Исследование цилиндрического резонатора, частично заполненного поглощающим диэлектриком// III ВНТК «Информационные системы и технологии–2003». Тезисы докладов. – Н.Новгород: НГТУ, 2003. – С.34-35.
17. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Резонансная ячейка для измерения параметров поглощающих диэлектриков// Методы и средства измерений физических величин: Тезисы докладов VII Всероссийской научно-технической конференции. Н. Новгород: НГТУ, 2003. – С. 23.
18. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Метод частичных областей в задачах исследования металло-диэлектрических резонансных структур // Физика и технические приложения волновых процессов. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы»: Тезисы докладов и сообщений II Международной НТК. – Самара, 2003. – С. 237.
19. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Исследование цилиндрического металлодиэлектрического резонатора // Антенны. – 2004. – Вып. 1 (80). – С.49–53.

20. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Исследование цилиндрического металлодиэлектрического резонатора с пленкой рубидия // ВНТК "Информационные системы и технологии – 2004". Тезисы докладов. – Н. Новгород: НГТУ, 2004. – С. 31–32.
21. Пихтелев Н.А. Экспериментальное и теоретическое исследование резонансной ячейки для неразрушающего измерения параметров диэлектриков // Тезисы докладов 9-й Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки). – Н.Новгород, 2004. – С. 102–103.
22. Белов Ю.Г., Пихтелев Н.А. Расчет цилиндрических резонаторов с частичным диэлектрическим заполнением, используемых для измерения параметров диэлектриков на СВЧ // Физика и технические приложения волновых процессов. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы»: Тезисы докладов и сообщений III международной НТК. – Волгоград, 2004.–С. 248–249.
23. Белов Ю.Г., Кудрявцев А.М., Пихтелев А.И., Пихтелев Н.А. Исследование резонансной СВЧ структуры с неоднородным металлодиэлектрическим заполнением // Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства. Труды НГТУ. – Т. 44. – Вып. 9 – Н. Новгород: НГТУ, 2004. – С. 5–9.

Литература

- Л.1. Никольский В.В. К обоснованию метода Трефтца для задач дифракции// Труды МИРЭА, 1974. – Вып.70. – С.3–35.
- Л.2. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайне высоких частот. – М.: Педагогика-Пресс, 1998. – 328с.
- Л.3. Бабунько С.А., Орлов О.С. Расчет и исследование полосовых фильтров в миниатюрном исполнении // Информационно-измерительные системы и управление.–2005.–Вып. 1.– С. 52 – 59.
- Л.4. Беляев А.А. Расчет и исследование частотных свойств специальных аксиально–симметричных резонаторов квантовых водородных дискриминаторов // Измерительная техника. – 1987.–№2. – С. 29–31.
- Л.5. Москалев И.Н., Кориткин И.П., Москалев М.И., и др. Микроволновая техника для газовой промышленности// Газовая промышленность, 1997. – №4.–

- Л.6. Налькин М.Е., Никулин С.М., Хилов В.П. Зондовый рефлектометр СВЧ диапазона // Измерительная техника, 2003. – №5. – С. 43–47.
- Л.7. Капилевич Б.Ю., Трубехин Е.Р. Волноводно-диэлектрические фильтрующие структуры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 272с.
- Л.8. Диэлектрические резонаторы/ М.Е. Ильченко, В.Ф. Взятыхшев, Л.Г. Гассанов и др. - М.: Радио и связь, 1989. – 328с.
- Л.9. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 403с.
- Л.10. Фетисов В.С. Средства измерения влажности нефти: Современное состояние, проблемы и перспективы (обзор)// Датчики и системы, 1999. – №3. – С.33–38.
- Л.11. Халиф А.Л., Туревский Е.И., Сайкин В.В. и др. Приборы для определения влажности газа. – М.: ИРЦ «Газпром», 1995. – 45с.
- Л.12. Афсар М.Н., Берч Дж.Р., Кларк Р.Н. Измерение характеристик материалов. Под ред. Дж.У. Чантри /ГИИЭР, 1986. – Т.74. – №1. – С.206–225.
- Л.13. Воробьев Е.А., Харитонов А.А. Развитие радиофизических методов неразрушающего контроля в производстве материалов и компонентов микроэлектронной техники // Физические методы и средства неразрушающего контроля в производстве микроэлектронной аппаратуры и ее компонентов. Сб. науч. трудов ЛИАП, 1986. – Вып.181. – С.49–51.
- Л.14. Пихтелёв А.И., Ульянов А.А., Фатеев Б.П. и др. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов. –М.: Сов. радио, 1978.–304 с.
- Л.15. Иларионов Ю.А., Раевский С.Б., Сморгонский В.Я. Расчет гофрированных и частично заполненных волноводов. – М.: Сов. радио, 1980. – 200с.
- Л.16. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металлюдиэлектрические волноводы. М.: Радио и связь, 1988. – 248с.
- Л.17. Раевский С.Б. К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями // Изв. вузов. Радиофизика, 1974.– Т. 17. – № 11. – С.576–580.
- Л.18. Белов Ю.Г., Раевская О.И., Раевский С.Б., Шишков Г.И. Двухслойный эл-

липтический волновод с резистивной пленкой // Техника средств связи. Серия: Радиоизмерительная техника. – 1982, Вып. 2 (41). – С. 39–45.

- Л.19. Раевский С.Б. Решение внутренних задач электродинамики с использованием непрерывного спектра в одной из частичных областей// Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1980. – Т.33. – №9. – С.27–32.
- Л.20. Белов Ю.Г., Раевский С.Б. Расчет резонатора для радиоспектроскопа// Радиотехника и электроника, 1980. – Т.25. – №7. – С.1370–1375.
- Л.21. Радионов А.А., Раевский С.Б. Расчет дисперсионных характеристик и коэффициентов затухания прямоугольного гофрированного волновода// Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1977. – Т.20. – №9. – С.69–73.

Подписано в печать 18.04.05. Формат 60 x 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 90 экз. Заказ 275.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.