

Институт радиоп физики и электроники им. А. Я. Усикова
Национальной академии наук Украины

На правах рукописи

УДК 621.378; 537.862

Носатюк Сергей Олегович

**ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ
В ЭКРАНИРОВАННЫХ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ
ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ**

01.04.03 – Радиоп физика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: Когут Александр Евгеньевич
доктор физ.-мат. наук

Харьков - 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ДАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	18
1.1. Резонансные системы мм диапазона длин волн.....	18
1.2. Способы возбуждения мод ШГ в открытых и экранированных КДР.....	31
Выводы к разделу 1.....	40
РАЗДЕЛ 2. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД ШГ В ЭКРАНИРОВАННЫХ КДР НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	41
2.1. Разрежение спектра полудискового и полушарового экранированных КДР путем использования планарного волновода.....	42
2.2. Зависимость энергетических характеристик полудискового и полушарового экранированных КДР от способов их возбуждения.....	56
Выводы к разделу 2.....	64
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СВЯЗЬ ЭКРАНИРОВАННЫХ КДР С ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ.....	66
3.1 Распределения резонансных полей мод ШГ в экранированных КДР и их зависимость от условий возбуждения.....	66
3.2 Распределения полей в планарном волноводе при его связи с экранированным КДР.....	73
Выводы к разделу 3.....	79
РАЗДЕЛ 4. ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ШГ В ВЫСОКОДОБРОТНОМ ДВУХСЛОЙНОМ ПОЛУШАРОВОМ ЭКРАНИРОВАННОМ КДР ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ	81
4.1. Спектральные и энергетические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР.....	83
4.2. Распределение полей в планарном волноводе, связанном с двухслойным	

полушаровым экранированным КДР.....	94
4.3. Электродинамические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР с асимметрией воздушного зазора.....	98
Выводы к разделу 4.....	103
РАЗДЕЛ 5. ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭКРАНИРОВАННОГО КДР ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ ЖИДКОСТЕЙ.....	106
5.1. Электродинамические характеристики полого полусферического экранированного КДР	108
5.2. Исследование электрофизических свойств спиртосодержащих растворов.....	114
Выводы к разделу 5.....	119
ВЫВОДЫ.....	121
ЛИТЕРАТУРА.....	125

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

СВЧ – сверхвысокие частоты

см волны– сантиметровые волны

мм волны – миллиметровые волны

субмм волны– субмиллиметровые волны

КДР – квазиоптический диэлектрический резонатор

моды ШГ – моды шепчущей галереи

p – параметр связи подводящего волновода с полями колебаний в резонаторе

КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению

ЛОВ – лампа обратной волны

f_n –резонансная частота

δf_n – изменение резонансной частоты

Δf_n – период сетки резонансных частот

Q_n – нагруженная добротность

Q_0 – собственная добротность

d – ширина щели связи

A_0 – амплитуда резонанса

A_{max} – наибольшая амплитуда резонанса

a – коэффициент ослабления сигнала

r_0 – радиальная координата середины щели вывода энергии

r_i – радиальная координата середины щели подвода энергии

ДР – диэлектрические резонаторы

ε – диэлектрическая постоянная материала

λ_d - длина волны в диэлектрическом материале

l – радиальный индекс мод колебаний

m – азимутальный индекс мод колебаний

n – полярный индекс мод колебаний

ДВ – диэлектрический волновод

L – высота цилиндра

R_1 – радиус диэлектрического элемента резонатора

R_2 – радиус полости металлического экрана

h – высота планарного волновода

АЧХ–амплитудно-частотная характеристика

V – объем исследуемой жидкости

b – ширина планарного волновода

c – длина планарного волновода

Введение

Актуальность темы. Резонаторы с распределенными параметрами являются одним из важнейших элементов электромагнитных цепей, поскольку обеспечивают селекцию мод в широком диапазоне длин волн [1]. Наибольшее распространение они получили в технике сверхвысоких частот (СВЧ), а именно, в коротковолновой части сантиметрового (см) и в миллиметровом (мм) диапазонах длин волн [2]. Определяющим фактором применения резонаторов являются их электродинамические характеристики.

Особое место в ряду резонаторов мм диапазона длин волн благодаря своей высокой добротности занимают открытые квазиоптические диэлектрические резонаторы (КДР) в виде диска или шара с модами шепчущей галереи (ШГ). Радиус R диэлектрических резонансных структур значительно превышает длину волны в них, как правило, $R > 5\lambda_d$. Главной электродинамической особенностью КДР является распределение полей мод ШГ. Их электромагнитные поля на собственной частоте резонаторов формируются волнами, распространяющимися вдоль криволинейной поверхности под такими пологими углами, что коэффициент их отражения от границы раздела сред диэлектрик-воздух близок к единице. Высокий коэффициент отражения мод ШГ от границы раздела сред диэлектрик-воздух определяет малые потери энергии на излучение в свободное пространство. По причине низких радиационных потерь энергии открытые КДР обладают высокой добротностью. Использование диэлектриков с высокой относительной диэлектрической проницаемостью позволяет уменьшить размеры таких резонаторов.

В настоящее время КДР с модами ШГ благодаря своей высокой добротности хорошо зарекомендовали себя в ряде устройств мм диапазона длин волн. К ним относятся автогенераторы, сумматоры мощности, фильтры и устройства для измерения электрофизических свойств различных материалов (диэлектрометры).

Однако, помимо очевидных достоинств открытые КДР с модами ШГ не лишены и недостатков. Главным из них является низкая помехозащищенность в силу их открытого характера. Решением данной проблемы является экранирование КДР. Однако, использование металлических поверхностей в конструкции резонатора приводит к появлению дополнительных омических потерь энергии на стенках экрана, что негативно сказывается на энергетических характеристиках резонатора в целом. Во-вторых, экранирование диэлектрических резонансных структур приводит к существенному сгущению спектра колебаний. Густота спектра колебаний экранированных КДР может быть настолько существенна, что на отдельных участках резонансные отклики отдельных колебаний «перекрываются», т.е. имеет место вырождение. С практической точки зрения это означает сложность достижения одночастотного отклика от резонансной системы.

Другой важной задачей как экспериментального исследования электродинамических характеристик КДР с модами ШГ, так и их применения в конкретных устройствах мм диапазона, является обеспечение высокой электромагнитной связи источника волн с резонансными полями колебаний. Главным критерием величины связи является параметр связи p . Существующие методы возбуждения путем использования локального источника возбуждения (элемента связи), расположенного в поле КДР (штырь, емкостная щель или петля связи) позволяют достигать не только критической ($p=1$), но и закритической связи ($p>1$). С одной стороны использование локальных источников возбуждения колебаний ШГ в КДР создает хорошие предпосылки для обеспечения эффективного подвода энергии электромагнитного поля от внешнего источника к КДР. С другой стороны их размещение внутри резонансного объема КДР приводит к ряду нежелательных эффектов, поскольку локальные источники возбуждения (элементы связи) являются возмущающими локальными неоднородностями. С точки зрения электродинамики это обозначает, что возмущение резонансного поля КДР локальными неоднородностями, приведет к изменению собственных

спектральных и энергетических характеристик КДР. Поскольку геометрические размеры элементов связи, как правило, сравнимы или больше длины волны, то это приводит к дополнительным дифракционным потерям. Вследствие этого добротность как основная энергетическая характеристика резонаторов может существенно ухудшаться. С точки зрения прикладной электродинамики величина собственной добротности резонаторов имеет большое значение. Известно, что именно эта энергетическая характеристика резонансных систем во многом определяет стабильность частоты генераторов, созданных на их основе, а также чувствительность измерений электрофизических свойств различных материалов в соответствующих устройствах – диэлектрометрах.

В связи с вышесказанным наиболее важными задачами резонаторной техники в настоящее время являются поиск и исследование новых форм экранированных КДР с улучшенными спектральными и энергетическими характеристиками, а также новых маловозмущающих и высокоэффективных способов возбуждения мод ШГ в них.

Изложенное выше определяет актуальность темы диссертационной работы.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнялась в отделе радиофизики твердого тела Института радиофизики и электроники им А.Я. Усикова НАН Украины в соответствии с планами выполненных (выполняемых) НИР:

- ✓ 1. «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток» (шифр теми «Кентавр-4») выполнялась с 2007 по 2011 г.г. (№ госрегистр. 0106U011978).
- ✓ 2. «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердо тільними структурами» (шифр теми

«Кентавр-5») выполняется с 2012 по 2016 г.г. (№ госрегр. 0112U000211).

Цель и задачи исследований.

Целью работы является поиск новых высокоэффективных способов возбуждения мод ШГ в высокودобротных экранированных КДР разных форм, а также исследование их электродинамических характеристик. Для достижения этой цели требуется решение следующих задач:

1. Экспериментальное исследование распределения интенсивности резонансных полей колебаний в экранированных КДР разных форм, а также спектральных и энергетических характеристик при различных положениях локального элемента связи внутри резонатора.
2. Изучение возможности возбуждения мод ШГ в экранированных КДР локальным источником, расположенным за пределами их резонансного объема в планарном волноводе.
3. Экспериментальное исследование электродинамических характеристик планарного волновода, связанного электромагнитной связью с экранированным КДР. Компьютерное моделирование волновых процессов в планарном волноводе и резонаторе. Сравнительный анализ эксперимента с расчетом.
4. Изучение возможности использования планарного волновода для эффективного возбуждения мод ШГ в экранированных КДР и вывода энергии их резонансного поля.
5. Поиск путей разрежения спектра экранированных КДР.
6. Исследование спектральных, энергетических характеристик и распределения полей мод ШГ в радиально двухслойных экранированных КДР (с воздушным зазором между диэлектриком и металлом) с помощью планарного волновода.
7. Исследование возможности создания резонансной ячейки диэлектрометра на основе экранированных КДР для исследования электрофизических

свойств жидкостей с высокими потерями энергии электромагнитного поля в мм диапазоне длин волн.

Решению этих задач посвящена данная диссертационная работа.

Объектом исследования являются экранированные квазиоптические диэлектрические резонаторы в режиме возбуждения мод шепчущей галереи планарным волноводом.

Предмет исследования – параметр связи экранированных диэлектрических резонаторов с планарным волноводом, спектральные и энергетические характеристики экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторов.

Методы исследований.

В работе использовались радиофизические методы измерений спектральных, энергетических и поляризационных характеристик вынужденных колебаний ШГ, а также распределений их полей в экранированных КДР разных форм.

Экспериментальные исследования осуществлялись с помощью панорамного измерителя КСВН Р2-65. Использовались две различные схемы включения экранированных КДР в волноводно-измерительную линию.

1. **Схема «на отражение».** Подвод энергии внешнего электромагнитного поля от широкополосного источника типа лампы обратной волны (ЛОВ) и вывод энергии из резонатора осуществлялся посредством одного элемента связи. Волноводная линия при этом содержала направленный ответвитель. Такая схема включения резонатора в волноводную линию позволяла определить его собственную добротность.

Для определения собственной добротности как основной энергетической характеристики резонатора использовался метод измерения полного сопротивления [3] (резонансный метод). Суть этого метода заключается в измерении резонансной частоты f_n и ширины Δf резонансного отклика по

уровню КСВН, соответствующему половинной мощности. Эти величины позволяют определить нагруженную добротность Q_n как $Q_n = f_n / \Delta f$.

Прямыми измерениями по соответствующей шкале панорамного измерителя КСВН определяется КСВН резонансов. Погрешность измерения КСВН согласно техническому описанию панорамного измерителя КСВН в процентах не превышает величины, определяемой по формуле

$$\delta K_{BCH} = \pm(5K_{BCH} + 2),$$

и в исследуемом диапазоне частот она составляет $7 \div 9$ %. Режим связи с подводимым волноводом контролируется путем внесения в поле колебаний малого по сравнению с длиной волны в резонаторе поглощающего тела [4]. Изменение амплитуды резонанса позволяет оценить режим связи подводимого волновода с полем колебания в КДР.

Учет потерь в экранированных КДР определяется следующим выражением, используемым для объемных резонаторов:

$$1/Q_n = 1/Q_0 + 1/Q_{св}.$$

В этом выражении общие потери энергии $1/Q_n$ представляются как сумма собственных потерь $1/Q_0$ в резонаторе и потерь на связь $1/Q_{св}$ с элементом подвода (вывода) энергии.

Для случая слабой связи ($p < 1$) величина $Q_{св} \rightarrow \infty$ и нагруженная добротность близка к собственной $Q_n \approx Q_0$.

При критической связи с резонатором ($p = 1$) $Q_{св} = Q_0$ и $Q_n = Q_0/2$.

Для закритической связи ($p > 1$) $Q_n \approx Q_{св}$.

В экспериментах систематическая погрешность определения нагруженной добротности не превышала 15%.

Измерение частот осуществлялось с помощью резонансного волномера на основе объемного перестраиваемого резонатора. Данный метод достаточно прост и не требует сложных вычислений. Его погрешность определяется относительной средней квадратичной погрешностью волномера, которая зависит от конечной ширины резонансного отклика, точности шкалы отсчета, люфта в отсчетной системе, погрешности образцового волномера и

температурной погрешности. Наибольшую систематическую погрешность в определении частоты вносит неточность шкалы используемого волномера, которая составляет 2 МГц на одно деление волномера. Таким образом, систематическая погрешность определения частоты в эксперименте невелика и в среднем составляет 0,05 %. При увеличении частоты погрешность измерений уменьшается.

2. Схема «на проход» предусматривала два элемента связи внешней волноводной линии с исследуемым резонатором, посредством которых осуществлялся подвод и вывод энергии из резонатора. Методика определения нагруженной добротности Q_n также как и собственной является резонансной. Измерения нагруженной добротности осуществляется по уровню -3дБ относительно амплитуды резонансного отклика на его центральной частоте.

Для исследования распределения интенсивности резонансных полей мод ШГ в КДР использовался метод пробного тела (малой возмущающей неоднородности) [5]. Данный метод заключается в экспериментальном определении изменения амплитуды резонанса при перемещении малого пробного тела, выполненного из сильно поглощающего материала, в области каустик поля мод ШГ. Квадратичная функция детектора позволяет по изменению амплитуды резонанса оценить относительную величину интенсивности полей колебаний в области расположения пробного тела.

Для изучения распределения полей мод ШГ в КДР, расположенных на металлическом зеркале, вдоль радиальной координаты использовался модифицированный метод пробного тела – метод пассивной щели в подвижном зеркале. Для проведения таких исследований плоское металлическое зеркало заменялось системой двух ограниченных зеркал, одно из которых было подвижным. В подвижном зеркале располагалась пассивная щель, выполняющая функции пробного тела. За точку отсчета выбиралась середина щели, ширина которой в эксперименте равнялась $d = 0,1 \div 0,5$ мм. При перемещении зеркала со щелью вдоль радиальной координаты резонатора исследовалась зависимость величины резонансного отклика, нормированной

к ее максимальному значению A_0/A_{max} от радиальной координаты подвижной щели r_0 . Эта зависимость позволяла оценить распределение интенсивности полей колебаний, возбуждаемых в исследуемых резонаторах. Прямыми измерениями получены данные о $KCBH$ резонансов, через которые величины A_0 и A_{max} при слабой связи с запитывающим трактом ($p < 1$) выражаются следующим образом:

$$A_0 = KCBH_0 - KCBH_{min}$$

$$A_{max} = KCBH_{max} - KCBH_{min},$$

где $KCBH_{max}$, $KCBH_{min}$ - максимальное и минимальное значения $KCBH$, соответственно, $KCBH_0$ - его текущее значение. Результаты исследований показали, что при использовании широкой щели (2,5 мм) она оказывает сильное возмущающее воздействие на поле колебаний, это особенно заметно в максимуме интенсивности. Использование узкой щели (0,1 мм) приводит к ослаблению чувствительности измерений, особенно осязаемое вблизи границ пятна поля.

Для идентификации поляризации возбуждаемых в резонаторе мод ШГ использовался метод возмущающей неоднородности. Пробное тело, обладающее отражательными свойствами, вносилось в поле резонатора. Принадлежность мод к HE - либо EH – поляризации в КДР с цилиндрическим типом криволинейной поверхности и TM - либо TE - поляризации в КДР со сферическим типом криволинейной поверхности оценивалось по сдвигу резонансного отклика в сторону более высоких либо более низких частот.

Теоретические исследования распределения интенсивности резонансных полей в различных экранированных КДР и планарном волноводе осуществлялись путем компьютерного моделирования посредством стандартного пакета программного обеспечения CST Microwave Studio 2011, предоставленного Восточно-Китайским НИИ «Фотоэлектроника» (г.Уху, Аньхой, КНР) в ходе совместных научных исследований.

Научная новизна:

Впервые исследованы электродинамические характеристики экранированных КДР сферической и цилиндрической формы в режиме возбуждения мод ШГ планарным волноводом. При этом получены следующие новые результаты:

1. Использование планарного волновода позволяет максимально разредить спектр экранированных КДР с приоритетным выделением мод ШГ.

2. Установлено, что в отличие от локальных источников возбуждения (элементов связи), планарный волновод мало влияет на формирование электродинамических характеристик экранированных КДР в режиме возбуждения мод ШГ.

3. Путем электромагнитной связи планарного волновода с двухслойным экранированным КДР сферической формы достигнута высокая добротность последнего. Показано хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных определения собственной добротности такого резонатора.

4. Установлено, что планарный волновод является высокоэффективным элементом вывода энергии поля мод ШГ из резонатора. Используемая схема включения экранированного КДР в цепь связи с планарными волноводами подвода и вывода энергии резонансного поля представляет собой фильтр резонансного типа.

5. Впервые предложено использование экранированных КДР в режиме возбуждения мод ШГ планарным волноводом для создания измерительной ячейки диэлектromетра с целью изучения электрофизических свойств жидкостей с высокими потерями энергии в мм диапазоне длин волн. Экспериментально установлено, что предложенная резонансная ячейка диэлектromетра обладает высокой разрешающей способностью измерений. Определены различительные признаки жидкостей с близкими комплексными диэлектрическими проницаемостями.

Практическая значимость.

Полученные результаты исследования электродинамических характеристик различных экранированных КДР в режиме возбуждения мод ШГ планарным волноводом являются предпосылкой для их использования в ряде активных и пассивных устройств мм диапазона длин волн с улучшенными выходными характеристиками.

1. Разреженный при использовании планарного волновода спектр экранированных КДР послужит основой при создании стабильных по частоте генераторов. В данном случае исключена возможность неконтролируемых скачков частоты, связанных с захватом зон генераций полями колебаний, физическая природа которых отлична от мод ШГ.

2. Высокая избирательность по частоте схемы включения высоккодобротных экранированных КДР в цепь связи с планарными волноводами подвода и вывода энергии резонансного поля позволяет использовать такую схему включения резонатора во внешнюю цепь связи при создании фильтров резонансного типа.

3. Малые потери резонансного поля в области связи с планарным волноводом обеспечивают высокую разрешающую способность измерений электрофизических свойств диэлектриков, в том числе с высокими потерями энергии, в диэлектрометрах мм диапазона длин волн.

4. Протяженные размеры планарного волновода и высокие значения параметра связи с высоккодобротным экранированным КДР могут использоваться для стабилизации частоты автогенератора, а также при создании сумматоров мощности.

Личный вклад автора диссертации заключается в проектировании лабораторных макетов, выборе методик экспериментальных исследований, проведении измерений, и участии в обсуждении полученных результатов.

Так в работах [6-18] автором проведены экспериментальные исследования электродинамических характеристик различных экранированных КДР с модами ШГ.

В работах [11-18] автором предложено использование планарного волновода (в опубликованных работах использовался термин «щелевая линия») для решения задачи разрежения спектра экранированных КДР с приоритетным выделением мод ШГ. Проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик данных резонаторов.

В работах [11-15, 18] с целью минимизации потерь энергии резонансного поля на локальном элементе связи предложен переход к новому типу связи – с планарным волноводом, позволяющему располагать локальный элемент возбуждения колебаний за пределами экранированных КДР. Исследованы энергетические характеристики экранированных КДР разных форм в режиме возбуждения мод ШГ щелью связи и планарным волноводом. Проведен сравнительный анализ электродинамических характеристик экранированных КДР при использовании данных двух способов возбуждения в них мод ШГ.

В работе [14] проведен сравнительный анализ энергетических характеристик и распределения интенсивности поля в радиально двухслойных экранированных КДР сферической формы для различных вариантов (симметричного и асимметричного) расположения диэлектрического элемента резонатора внутри металлической полости.

В работе [18] проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов исследования распределения резонансных полей мод ШГ в экранированном КДР и связанным с ним посредством электромагнитной связи планарном волноводе.

В работах [16-17] автором предложена конструкция высокочувствительной измерительной ячейки диэлектromетра резонансного типа на основе полого металлического экрана сферической формы в режиме возбуждения мод ШГ в нем планарным волноводом. Проведены исследования

электрофизических свойств спиртосодержащих жидкостей с близкими значениями комплексной диэлектрической проницаемости.

Апробация результатов диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты доложены на следующих конференциях и симпозиумах:

- 20, 22, 24, Крымских международных конференциях “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” Севастополь, Крым, Украина. 2010, 2012, 2014г.
- 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves Kharkov, Ukraine, 2010.
- 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves Kharkov, Ukraine, 2013.
- 2015 International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015). Dnipropetrovsk, Ukraine, September 29 – October 2, 2015.

Публикации

Основное содержание диссертации изложено в 13 научных публикациях, в том числе, в 6 статьях (все статьи в специализированных научных изданиях), в 7 материалах и трудах научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, пяти разделов, выводов, перечня использованных источников научной литературы. Объем диссертации составляет 146 страниц, из которых 107 страниц основного текста. Диссертация содержит 40 рисунков. Список использованных источников научной литературы на 22 страницах насчитывает 163 наименования.

РАЗДЕЛ 1. ОБЗОР ДАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Одним из приоритетных направлений развития современной радиофизической науки является освоение миллиметрового (мм) и субмиллиметрового (субмм) диапазонов длин волн. Такие тенденции развития в первую очередь определяются потребностями современной техники в различных областях. В настоящее время мм волны нашли широкое применение в системах связи и телекоммуникационных системах [19-22], навигационных системах [23-25], ближней и дальней радиолокации [26-29], в приборах медицинского назначения [30-33], охранных системах и системах безопасности [34]. При этом особое место в ряду задач радиофизики занимают задачи модовой селекции волн и колебаний поскольку затрагивают большинство ее составных частей. Решение задач модовой селекции необходимо при создании излучающих модулей на основе высокостабильных по частоте твердотельных [35-39] и электронно-вакуумных источников [40-44], при оптимизации условий распространения радиоволн (выбора трасс) [45-48], при приеме и обработке сигнала.

1.1. Резонансные системы мм диапазона длин волн.

Устройствами, призванными решать задачи селекции волн (колебаний) в мм диапазоне длин волн, являются резонаторы с распределенными параметрами. По аналогии с электродинамическими системами термин «распределенные параметры» является удобным для описания резонаторов, размеры которых сопоставимы либо превышают длину волны. При этом такая терминология описывает введение распределённых элементов - погонной ёмкости, индуктивности и проводимости. Основной энергетической

характеристикой резонаторов с распределенными параметрами, также как и колебательных контуров с сосредоточенными параметрами, качественно определяющей их селективные свойства, является добротность. Именно величина добротности определяет ширину полосы пропускания (запираания) фильтров на выходе излучающих и на входе приемных модулей.

Обратимся к различным видам резонаторов, используемых в мм диапазоне длин волн и проведем анализ их функциональных возможностей с позиций электродинамических характеристик.

Наиболее широкое применение в длинноволновой части мм диапазона длин волн получили объемные резонаторы волноводного типа. Такие резонаторы создаются на основе отрезков металлических волноводов с воздушным заполнением либо заполненных диэлектриком с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости ε (волноводно-диэлектрические резонаторы) [2, 49-52]. Резонансное поле занимает весь объем таких резонаторов. Поэтому в ряде работ, как например [53] для описания электродинамических процессов в них используют термин «объемный резонанс». Существенный вклад в собственные потери резонаторов волноводного типа вносят омические потери. По этой причине в ряде случаев резонаторы волноводного типа обладают сравнительно невысокой добротностью. Несколько повысить добротность за счет концентрации резонансного поля в середине полости резонатора и снижения омических потерь энергии позволяют волноводно-диэлектрические резонаторы. Однако с технологической точки зрения их использование в коротковолновой части мм и в субмм диапазонах длин волн становится затруднительным. Это объясняется тем, что для получения одномодового режима геометрические размеры объемного резонатора должны быть сравнимы с рабочей длиной волны. Следовательно, уже начиная с мм диапазона, объемные резонаторы должны иметь малые размеры. При этом их изготовление сопряжено с рядом трудностей. Кроме того, при уменьшении

объема, занимаемого полем рабочей моды, повышаются омические потери, а следовательно, снижается добротность резонаторов.

Принцип объемного резонанса лежит в основе создания и открытых диэлектрических резонаторов (ДР), используемых на низших типах колебаний [52-56]. По аналогии с резонаторами волноводного типа резонансное поле заполняет весь объем резонансной структуры. В качестве материала таких резонаторов обычно выбирают диэлектрики с относительной диэлектрической проницаемостью не менее нескольких десятков. При таких значениях относительной диэлектрической проницаемости материала ДР электрические и магнитные поля колебаний в основном сосредоточены внутри диэлектрика и за его пределами уменьшаются до пренебрежимо малых значений уже на расстояниях, малых по сравнению с длиной волны в свободном пространстве. Поэтому их резонансные свойства определяет объемный резонанс непосредственно в диэлектрике. Благодаря высокой относительной диэлектрической проницаемости размеры ДР существенно уменьшаются по сравнению с размерами резонаторов волноводного типа с воздушным заполнением. Наиболее распространенными по форме являются ДР в виде цилиндра или параллелепипеда. Величина добротности таких резонаторов во многом определяется не только их геометрическими параметрами и физическими свойствами материала, используемого для их изготовления, но и радиационными потерями энергии по причине их открытого характера. Общим свойством всех открытых ДР является их излучение, оцениваемое радиационной добротностью со значениями порядка сотни единиц для резонаторов с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon \approx 80$ [53]. Столь низкая радиационная добротность существенно снижает собственную добротность ДР на низших типах колебаний. Кроме того использование ДР на низших типах колебаний становится затруднительным уже в коротковолновой части мм диапазона по причине технологических трудностей обработки материалов, из которых они изготовлены.

Новые возможности по использованию в широком диапазоне длин волн открывают квазиоптические резонаторы, размеры которых превышают длину волны как минимум в десять раз. Наибольшее распространение получили открытые квазиоптические резонаторы на основе двух и более металлических зеркал [2, 49]. Как правило, используются открытые квазиоптические резонаторы, образованные двумя зеркалами сферической либо цилиндрической формы. Одно из зеркал также может быть плоским. Электрическое и магнитное поле сосредоточено в пространстве между двумя зеркалами (внутри резонатора), несмотря на его открытый характер, за счет образования каустики. Радиационные потери на излучение в свободное пространство малы. По этой причине открытые квазиоптические резонаторы обладают высокой добротностью, которая составляет от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч единиц. Физические явления, связанные с распространением волн внутри таких резонаторов, могут быть представлены с позиций геометрической оптики в отличие от резонаторов, размеры которых сопоставимы с длиной волны в них. Это создает определенные удобства с позиций описания волновых процессов.

Недостатком открытых квазиоптических резонаторов является их многомодовость, которая отражается в густом спектре колебаний, что затрудняет их использование. Существенно разредить спектр таких резонаторов позволяет переход к металлическим зеркалам, одно из которых заменено отражательной дифракционной решеткой – эшелеттом [2, 58-61]. Размер ступеньки эшелетта соответствует половине основной длины волны. На основной частоте луч отражается от решетки в том же направлении, что и падает перпендикулярно ступенькам. Для других частот падающий и отраженный лучи образуют угол, пропорциональный относительному сдвигу частот. Моды, частоты которых не соответствуют основной частоте, при этом не возбуждаются за счет высоких радиационных потерь энергии либо эффективность их возбуждения существенно мала по сравнению с основной модой.

В настоящее время открытые квазиоптические резонаторы нашли применение в качестве колебательных систем генераторов мм волн [62-65]. На их основе созданы измерительные ячейки диэлектрометров для изучения широкого класса материалов [66, 67].

Однако, наряду с очевидными достоинствами открытые квазиоптические резонаторы обладают некоторыми недостатками с прикладной точки зрения. Во-первых, они обладают большими габаритами, что затрудняет их использование в конкретных устройствах мм диапазона длин волн. Во-вторых, конструктивные особенности таких резонаторов создают определенные неудобства, связанные с расположением активных элементов, элементов их согласования и подвода питания, при создании генераторов на основе открытых квазиоптических резонаторов.

Решить данные проблемы позволяют квазиоптические диэлектрические резонаторы (КДР), используемые в режиме высших типов колебаний [53, 68]. Наряду с термином «высшие типы колебаний» в литературе также встречается терминология – «азимутальные колебания» [53,69-72] и «колебания (волны) шепчущей галереи» [73-78]. По аналогии с акустическими модами, обладающими аномально малыми потерями энергии [73], в дальнейшем будем пользоваться термином «моды шепчущей галереи (ШГ)». Моды ШГ возбуждаются в диэлектрических структурах в виде тел вращения (кольцо, диск, цилиндр, конус, шар), размеры которых, а именно радиус кривизны $R \geq 5\lambda_d$, где λ_d - длина волны в диэлектрическом материале резонатора (условие квазиоптики). Распространяясь внутри таких структур волны, образующие резонансные моды ШГ, падают на их внутреннюю криволинейную поверхность под очень пологими углами, так что коэффициент отражения от границы раздела сред близок к единице. При этом радиационные потери энергии могут быть пренебрежимо малы. Из этого следует, что добротность таких КДР, в основном, определяется потерями в материале резонатора. В отличие от резонаторов на низших типах колебаний, которые используют

явление объемного резонанса, энергия электромагнитного поля мод ШГ в КДР сосредоточена в узкой полосе вблизи криволинейной поверхности диэлектрической резонансной структуры [53, 68]. В центральной части КДР поля мод ШГ отсутствуют. В свободном пространстве, окружающем КДР, напряженность полей мод ШГ снижается до предельно малых значений уже на расстояниях, сравнимых с длиной волны λ_d . Поскольку описание процессов, связанных с возбуждением мод ШГ в КДР разных форм, подчиняется законам геометрической оптики, то важным и необходимым условием их существования является выполнение условия $\varepsilon_d > \varepsilon_0$, где ε_d – относительная диэлектрическая проницаемость материала КДР, ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость, пространства, окружающего КДР.

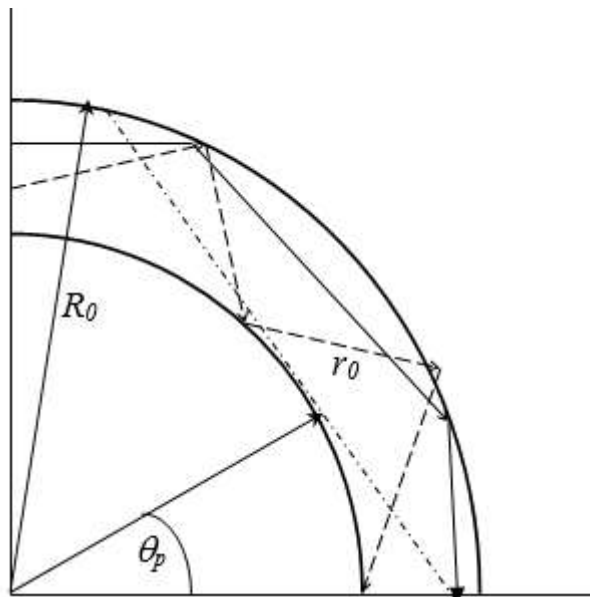


Рис.1.1 Схематический ход лучей азимутальных колебаний: типа ШГ (сплошные линии) и волноводного типа (штриховые линии).

С позиций геометрической оптики различие мод ШГ и мод волноводного типа (подобными модам в резонаторах бегущей волны) легко видеть из рис 1.1. На нем схематически изображена четверть кольца из диэлектрического материала с внешним радиусом R_0 и внутренним радиусом r_0 . Показаны лучи распространения электромагнитных волн, формирующих

моды ШГ (сплошные линии), отражающихся лишь от внешней границы резонатора.

Лучи для мод волноводного типа (штриховые линии) претерпевают отражения от обеих цилиндрических границ кольца. Лучи, соответствующие данным двум типам мод различаются углами падения на внешнюю границу кольца. Угол θ_p наклона хорды (штрих-пунктирная линия) к оси абсцисс, касающейся отверстия кольца, является критическим углом, разделяющим углы падения волн этих двух типов, определяется соотношением $\sin \theta_p = r_0/R_0$.

При выполнении условия полного внутреннего отражения лучей на обеих границах кольца для волноводной моды ($\sin \theta_p \geq (1/\varepsilon)^{1/2}$, где $\theta < \theta_p$) получаем $r_0/R_0 > (1/\varepsilon)^{1/2}$. Это соотношение обуславливает возможность распространения волноводной моды в кольце. Если угол падения превышает угол θ_p , т.е. при $\sin \theta_p > r_0/R_0$ в кольце возбуждаются волны ШГ. Так как степень проникновения электромагнитных волн во внешнюю среду обратно пропорциональна углу падения- колебания типа ШГ всегда теряют меньше энергии во внешнем пространстве, поэтому добротность резонаторов на этих модах выше.

Обычно под диском и кольцом подразумевают фрагмент цилиндра с основанием в виде круга или кольца, радиус которых R_0 превосходит его длину L . Все моды ШГ формируют в диске (кольце) поля, имеющие гибридный характер [68]. Они содержат все шесть компонент электромагнитного поля. Поэтому традиционно их обозначают двойными символами HE или EH в зависимости, от того какая из составляющих E_z или H_z соответственно является преобладающей. Ось Z направлена вдоль оси диска (кольца). Количество вариаций полей мод по азимутальной (φ), радиальной (r) и аксиальной (z) координатам обозначаются индексами n, m, l , соответственно. В радиальном направлении электромагнитные поля ограничены двумя цилиндрическими каустическими поверхностями: внутренней каустикой при $r_{k1} = n\lambda / (2\pi\varepsilon^{1/2})$ и внешней при $r_{k2} = n\lambda / (2\pi)$. Азимутальные моды являются

двукратно вырожденными с взаимным сдвигом фаз на 90° . Среди азимутальных типов колебаний основными считаются моды с радиальными и аксиальными индексами равными единице ($m=l=1$). В зависимости от способов возбуждения КДР с цилиндрическим типом криволинейной поверхности возможно достижение двух режимов формирования мод ШГ в них, а именно, бегущей либо стоячей волны.

Увеличение длины диэлектрической структуры с цилиндрической формой криволинейной поверхности приводит к возможности существования в нем мод с индексами $l > 1$ [68, 79]. С позиций электродинамики принято различать дисковые и цилиндрические КДР. Для последних характерна аксиальная многомодовость (наличие мод с индексами $l > 1$). Экспериментально особенности мод ШГ в цилиндрических КДР с $L > R$ (L – высота цилиндра) изучены недостаточно, несмотря на то, что увеличение длины цилиндра расширяет функциональные возможности при использовании таких резонаторов.

Теоретическому исследованию собственных колебаний КДР в форме диска и цилиндра посвящено большое количество работ [68, 80-87]. Строгое решение электродинамической задачи о собственных колебаниях цилиндрических и дисковых резонаторов затруднено из-за наличия некоординатной открытой граничной поверхности в основании цилиндра с резкими изломами между средами с различными диэлектрическими проницаемостями, а также из-за необходимости учета дифракционных явлений при рассеянии волн на такой границе и излучения электромагнитной энергии во внешнее пространство. Поэтому исследования таких резонаторов производятся приближенными методами.

Теоретические исследования КДР сферической формы отличаются от исследований цилиндрических и дисковых резонаторов возможностью строгого учета внешних полей, потому что граница раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями совпадает с координатной поверхностью

в сферической системе координат. Это позволяет применять строгие методы для теоретических исследований [1, 53, 88-91]. Центральная симметрия шара определяет классификацию колебаний в нем отличную от цилиндра и диска. В сферических КДР существуют $TM_{nml}(E_r \neq 0)$ и $TE_{nml}(E_r = 0)$ независимые колебания, где n, m, l - число вариаций поля по полярной, азимутальной и радиальной координатам, соответственно. При этом собственные колебания типа ШГ оказываются $(2n+1)$ -кратно вырождены.

С целью расширения функциональных возможностей открытых КДР с модами ШГ, уменьшения их габаритов и обеспечения критических и закритических режимов связи с ними, было предложено использовать половину диэлектрических тел вращения (цилиндр, шар), размещенных на плоском металлическом зеркале. Последнее выполняет функцию недостающей половины цилиндра или шара [92-100]. Кроме того, металлическое зеркало является базой для расположения элементов возбуждения, в частности активных элементов при построении автогенераторов мм диапазона на основе КДР [101-106]. В дальнейшем будем рассматривать именно КДР, сформированные половиной диэлектрических тел вращения, размещенных на плоском металлическом зеркале. Основной особенностью собственных мод ШГ в открытых КДР в виде половины цилиндра на металлическом зеркале является снятие вырождения и отсутствие возможности возбуждения бегущих волн в них. Замена одной половины диэлектрического шара плоским металлическим зеркалом приводит к понижению вырождения колебаний до $(n+1)$ - кратности. В таких резонаторах возможен только режим стоячей волны.

Сравнительный анализ КДР на основе полудиска, половины цилиндра и полушара с одинаковыми радиусами кривизны показал, что наибольшей собственной добротностью обладают резонаторы со сферическим типом криволинейной поверхности [68, 107]. Предполагая, что радиационные потери со стороны криволинейной поверхности таких КДР близки можно предположить, что у КДР с цилиндрическим типом криволинейной

поверхности основной вклад в радиационные потери вносит излучение волн с плоских оснований. В КДР со сферическим типом криволинейной поверхности отсутствуют резкие границы раздела сред в виде плоских срезов в диске и цилиндре, что повышает радиационную и собственную добротности таких резонаторов.

Переходя к рассмотрению прикладных аспектов использования открытых КДР, необходимо отметить, что в настоящее время они хорошо зарекомендовали себя в ряде устройств мм диапазона длин волн. Так на основе КДР разных форм созданы макеты твердотельных генераторов с высокой стабильностью частоты выходного сигнала. Полушаровой КДР нашел применение в виде основы двухдиодного сумматора мощности с высоким коэффициентом суммирования мощностей отдельных диодов [107]. На основе цилиндрического и четвертьшарового КДР созданы макеты трехдиодных сумматоров мощности [78, 107]. Диэлектрические резонаторы разных форм используются при создании фильтров [108-112]. Диск и полудиск КДР послужили измерительными ячейками диэлектрометров для изучения электрофизических свойств твердых [113-118] и жидких диэлектриков [104, 105, 119-123]. На основе полушарового КДР с модами ШГ предложена методика определения комплексной диэлектрической проницаемости льда в 8-мм диапазоне длин волн [124]. Необходимо отметить, что ряд устройств и методик использования открытых КДР был предложен сотрудниками ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины, организации, в которой была выполнена данная работа. Кроме того, именно в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины был впервые предложен и исследован полушаровой КДР с модами ШГ.

Однако, главным фактором, препятствующим внедрению КДР в технику мм волн, является их открытый характер. С одной стороны он является причиной слабой помехозащищенности устройств и приборов на основе открытых КДР со стороны других излучающих модулей в мм диапазоне длин волн. С другой стороны, существует риск паразитной обратной

электромагнитной связи открытых КДР с совмещенными с ними другими узлами и модулями, что может негативно отразиться на их работе.

Перечисленные факторы являются основанием для поиска новых конструкций резонаторных устройств на основе КДР, которые бы являлись привлекательными не только с точки зрения высоких показателей электродинамических характеристик, но и с прикладной точки зрения.

Решением проблем помехозащищенности является экранирование КДР. Экранированные либо радиально двухслойные КДР составляют особый класс резонаторов, возбуждаемых на модах ШГ. В литературных источниках о результатах исследования электродинамических характеристиках экранированных КДР преобладают теоретические работы. Получены дисперсионные уравнения и созданы расчетные модели для экранированных КДР с цилиндрической [93, 125-128] и сферической [129-131] формами криволинейной поверхности. Во внимание принимались экранированные диэлектрические структуры, изготовленные как из изотропных, так и из анизотропных материалов. Необходимо отметить, что главным образом исследования экранированных КДР осуществлялось расчетными методами с построением теоретических моделей. Такое преобладание теории над экспериментом можно объяснить следующим. Во-первых, как показано в работе [132], экранирование КДР, которые сами являются многомодовыми, приводит к дополнительному сгущению спектра. Помимо мод, поля которых сконцентрированы в диэлектрическом элементе резонатора, в спектре экранированных КДР присутствуют и моды экранного типа [125, 132, 133]. Высокая густота спектра вынужденных колебаний экранированных КДР разной формы существенно затрудняет экспериментальное исследование их электродинамических характеристик. Во-вторых, важную роль в постановке эксперимента играют способы возбуждения мод определенного типа в резонансных структурах. Экранирование КДР значительно сужает

возможности использования различных условий и способов возбуждения мод ШГ в них по сравнению с подобными открытыми резонаторами.

Доступные в научной литературе данные об экспериментальных исследованиях экранированных КДР показали, что наличие проводящей поверхности в конструкции таких резонаторов приводит к существенному сгущению их спектральных характеристик. Наряду с модами высших порядков типа шепчущей галереи в экранированных КДР существуют моды высших порядков других типов. В первую очередь к ним относятся так называемые лучевые колебания [134, 135]. В отличие от мод ШГ их поля глубже локализованы в области диэлектрика. Известно, что области локализации полей мод ШГ в КДР ограничены каустическими поверхностями, положение которых определяются только параметрами самого резонатора и выбором рабочей частоты. В отличие от этого локализация полей лучевых колебаний во многом зависит от положения источника возбуждения. С позиций геометрической оптики формирование лучевых колебаний может быть представлено в виде N-угольника, вписанного в окружность резонатора. Необходимо отметить, что в открытых КДР, лучевые колебаний не возбуждаются по причине невыполнения условия полного внутреннего отражения волн от криволинейной поверхности КДР. Помимо лучевых колебаний в спектре вынужденных мод КДР могут присутствовать колебания типа «бильярд» [136] и колебания типа «прыгающий мячик» [135]. Таким образом, густота спектра вынужденных мод экранированных КДР может быть настолько высокой, что на отдельных частотных участках резонансные отклики разных типов колебаний могут перекрываться, что существенно затрудняет исследование спектральных и энергетических характеристик резонаторов.

Вторым существенным недостатком экранированных резонансных структур является снижение добротности по сравнению с подобными открытыми КДР из-за роста потерь энергии по причине влияния проводящего

экрана. Так в работах [125-128] показано, что большое влияние на формирование энергетических характеристик экранированных КДР оказывают омические потери в металлических стенках резонатора. При этом возможна трансформация «диэлектрических типов колебаний в экранные» [125]. В качестве объекта исследования в этой работе был выбран экранированный лейкосапфировый диск. Отмечено, что влияние экрана на частоты мод ШГ и добротность резонатора при разных соотношениях радиусов и высот экрана и лейкосапфирового диска выражено в разной степени. В одних случаях добротность азимутальных колебаний велика $Q_0 \sim 10^7$ и определяется в основном тепловыми потерями в лейкосапфире, а в других случаях эта добротность на 2-3 порядка ниже и сравнима с добротностью полого металлического резонатора. В данной работе расчетным путем указаны перспективы достижения высоких значений добротности экранированных КДР путем перехода к радиально слоистым (диэлектрик-воздух-металл) резонансным структурам.

Детально эффект повышения добротности в экранированных КДР сферической формы был изучен в работах [130,131, 133]. Расчетным путем было показано, что в шаровых и полушаровых экранированных КДР, при определенных соотношениях радиусов диэлектрического элемента резонатора и его экрана резонансное поле главным образом концентрируется в воздушном зазоре. При этом потери энергии в металлическом экране пренебрежимо малы. Влияние диссипативных потерь в диэлектрическом материале экранированного КДР на значение его собственной добротности не столь велико, как в подобном открытом КДР, в котором резонансное поле в основном сосредоточено в области диэлектрика. Экспериментальные исследования электродинамических характеристик таких высокодобротных экранированных КДР, проведенные ранее, носили лишь оценочный характер. Детально не были изучены распределения резонансных полей мод ШГ и их спектральные характеристики. Основные трудности исследований были сопряжены с выбором условий возбуждения высокодобротных мод ШГ в

экранированных КДР. Используемый локальный элемент связи в виде щели связи на металлическом зеркале резонатора вносил возмущения в поле резонатора и искажал его собственные электродинамические характеристики.

Как показано в большинстве экспериментальных работ по изучению свойств открытых и экранированных КДР, большое внимание уделяется именно выбору соответствующих методов и способов возбуждения мод ШГ в них. Детально известные методы возбуждения, их преимущества и недостатки рассмотрены в пункте 1.2 данного раздела диссертационной работы.

1.2. Способы возбуждения мод ШГ в открытых и экранированных КДР.

В настоящее время КДР с модами ШГ нашли применение в ряде устройств мм диапазона длин волн. Как было отмечено выше, на их основе созданы высокостабильные твердотельные атогенераторы и сумматоры мощности с высоким коэффициентом суммирования мощностей диодов, они являются базовыми элементами диэлектрометров, предназначенных для исследования электрофизических свойств различных материалов в твердом и жидком состояниях. Такие устройства требуют адекватных их свойствам эффективных связей резонаторов с радиотехническими цепями и их отдельными элементами. Конструктивные особенности элементов связи КДР с линиями передач учитывают как требования, предъявляемые конструкцией резонатора, так и линиям передач, в которые они включаются.

При использовании в сантиметровом диапазоне коаксиальных линий передач для связи с КДР, возбуждаемыми как на низших типах колебаний [137, 138], так и на высших [117, 139], широко используются короткие штыревые антенны или индуктивные петли, образованные внутренним проводником коаксиальной линии. С переходом в мм диапазон для возбуждения открытых КДР на модах ШГ в большинстве случаев используются другие элементы возбуждения, основанные на связи КДР с

волноведущими линиями на основе металлических и диэлектрических волноводов. В зависимости от соотношения размеров участка связи и самих элементов связи с рабочей длиной волны принято разделять последние на локальные элементы связи и элементы связи, использующие принцип распределенной связи с открытыми КДР.

Классическим примером локального элемента связи является открытый конец металлического волновода прямоугольного сечения. Такая связь наиболее часто используется при необходимости осуществления сильной связи. В частности такая необходимость возникает в случае использования высокочастотных КДР в качестве колебательных систем автогенераторов, для которых необходима обратная связь активного элемента с полями рабочих колебаний в резонаторе. Закрытая связь в этом случае как раз и обеспечивает выполнение данного условия. С целью улучшения согласования между элементами цепи открытый конец волновода сужается по узкой стенке, а иногда дополнительно заполняется диэлектриком. Так в работе [140] использовалось возбуждение мод ШГ со стороны криволинейной поверхности цилиндрического КДР, изготовленного из лейкосапфира, открытым концом зауженного прямоугольного волновода, заполненного диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 10. В резонаторе возбуждались EH колебания. Колебания HE типа возбуждать со стороны цилиндрической поверхности резонатора таким способом затруднительно. Возможность возбуждения колебаний EH и HE типов открытым концом волновода реализуется при возбуждении КДР цилиндрической формы со стороны его плоской торцевой поверхности. При этом изменяется ориентация широкой стенки волновода относительно радиуса плоского торцевого основания диэлектрического цилиндра. Так при ориентации широкой стенки волновода вдоль радиуса торцевого основания цилиндра в нем преимущественно возбуждаются колебания EH типа. В случае перпендикулярного расположения широкой стенки волновода относительно радиуса плоской поверхности цилиндра – HE типа. Данная методика

возбуждения колебаний EH и HE типов нашла применение и для дисковых КДР.

В работе [141] для более полной реализации преимуществ высокодобротных КДР с цилиндрическим типом криволинейной поверхности предложено использовать многоэлементные устройства возбуждения, состоящие из нескольких облучателей в виде открытых концов волноводов. При электрической длине волновода, соединяющего два облучателя, кратной λ_d , в диаметрально противоположных концах резонатора будет возбуждаться синхронно волна в одной и той же фазе. В случае возбуждения в цилиндрических КДР с четными значениями азимутальных индексов амплитуда вводимого сигнала удваивается. При этом наличие второго облучателя дало выигрыш в величине связи.

Естественно, что для возбуждения мод ШГ в диэлектрическом шаре применимы способы возбуждения открытым концом одного либо нескольких волноводов. При этом, в силу центральной симметрии такой резонансной структуры, в нем одновременно возбуждаются как TM -, так и TE -моды. Основным недостатком использования КДР в виде полных тел вращения (диск, цилиндр, шар) является трудность достижения высоких значений параметра связи (выше критической). Как видно из приведенных выше способов возбуждения, локальные элементы связи располагаются за пределами диэлектрических резонансных структур либо на их поверхности (рис. 1.2а).

С точки зрения распределения полей мод в открытых КДР связь с внешними линиями передачи осуществляется в местах с невысокими значениями интенсивности резонансного поля (на спадающих участках рис. 1.2 а, 1.2 в), поскольку области «сильного» поля мод ШГ сконцентрированы в области самой диэлектрической структуры.

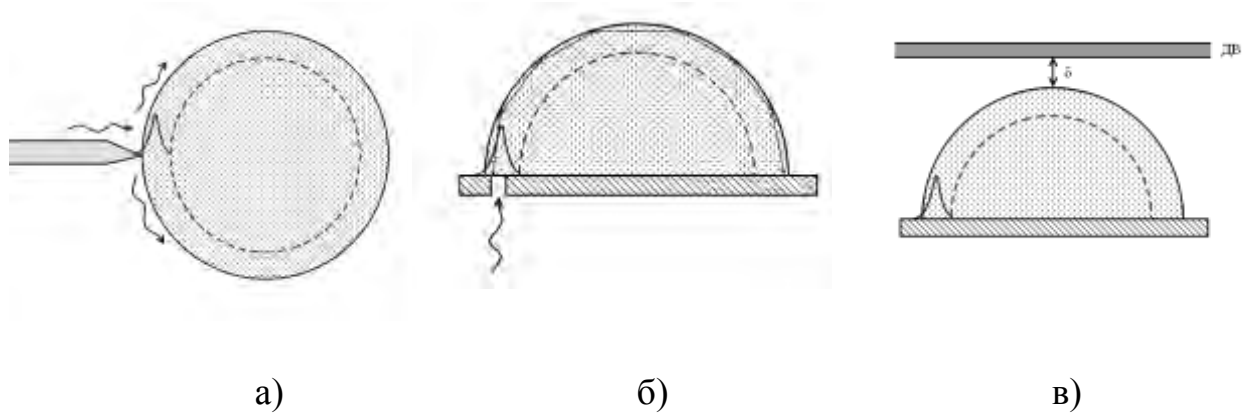


Рис. 1.2. Способы возбуждения мод ШГ в КДР локальным элементом связи (а, б) и путем распределенной связи с ДВ (в).

Расширить возможности КДР по достижению более высокой связи, как отмечалось ранее, позволяют КДР в виде половины тел вращения, расположенные на плоском металлическом зеркале. При этом появляется возможность располагать открытый конец волновода на металлическом зеркале и возбуждать моды ШГ изнутри резонатора (рис. 1.2б). На металлическом зеркале открытый конец волновода образует щель связи. Изменяя положение щели связи вдоль радиальной координаты, появляется возможность располагать элемент связи на участках полей с наибольшей интенсивностью, достигая тем самым наибольших значений параметра связи. В серии работ по возбуждению КДР в виде половины тел вращения (диска, цилиндра, шара) щелью связи в металлическом зеркале [92, 97-100, 112, 142] показано, что с помощью такого способа возбуждения мод ШГ можно в широких пределах изменять величину связи от слабой связи ($p < 1$) до закритической связи ($p > 1$). В зависимости от ориентации широкой стенки щели связи относительно радиуса плоского торцевого основания структур с цилиндрическим типом криволинейной поверхности в них формируются поля колебаний EH (перпендикулярно) либо HE типа (параллельно). В полушаровых КДР таким образом возбуждаются TM либо TE моды. При возбуждении TM мод щелью связи в металлическом зеркале наблюдается спектр резонансных колебаний, поля которых на криволинейной поверхности

образуют «пояски» в направлении полярной координаты с одной и двумя вариациями поля вдоль азимутальной координаты [94]. Эти «пояски» образуются волнами, нормально падающими на поверхность зеркала и отражающимися от него по нормали. Для существования таких колебаний наличие металлического зеркала необходимо. При возбуждении TE мод ШГ щелью связи в зеркале наблюдается чрезвычайно густой спектр резонансных колебаний [143]. Это затрудняет широкое использование полушаровых КДР с TE модами ШГ в практических целях.

Необходимо отметить, что для КДР с металлическим зеркалом применимы и способы возбуждения открытым концом волновода со стороны их криволинейной поверхности. При этом во всех случаях в них осуществляется возбуждения мод ШГ в режиме стоячей волны.

Главным недостатком использования локальных элементов связи с КДР разных форм является их негативное влияние на величину собственной добротности резонаторов. В первую очередь локальные элементы связи следует рассматривать как неоднородности, расположенные в поле резонатора. Их наличие приводит к росту радиационных потерь. Как показано в работах [117, 149, 150] влияние локальных элементов связи на снижение собственной добротности открытых КДР в ряде случаев может быть существенным. Очевидно, что величина радиационных потерь при рассеянии энергии, запасаемой в резонаторе, на краях локального элемента связи определяется его положением относительно максимума интенсивности резонансного поля. При расположении локального элемента связи в области наибольших значений интенсивности резонансного поля такие радиационные потери наиболее высоки [112, 145].

Понизить степень влияния элементов возбуждения на формирование энергетических характеристик открытых КДР позволяет использование распределенной связи [68]. Чаще всего с точки зрения эксперимента рассматривается связь открытых КДР с диэлектрическими волноводами (ДВ).

Известно, что основанная часть электромагнитного поля мод ШГ сосредоточена вблизи криволинейной поверхности открытых КДР. Однако часть поля локализуется вблизи этой поверхности и вне диэлектрика. Поле вне резонатора разделяется внешней каустической поверхностью на две области [68]. В области между криволинейной поверхностью КДР и внешней каустической поверхностью моды ШГ затухают, а их поля почти экспоненциально убывают в радиальном направлении. Вне этой области затухшие волны, у которых фазовая скорость сравнялась со скоростью света, излучаются в свободное пространство. При расположении источника возбуждения между резонатором и внешней каустической поверхностью осуществляется эффективная связь волн, распространяющихся в резонаторе вдоль его криволинейной поверхности, с волной в ДВ. При этом может реализоваться оптимальная (критическая) связь $p = 1$, когда осуществляется синхронизм этих волн: фазовая скорость волноводной волны и линейная скорость волны, образующей в КДР моды ШГ, совпадают. При расположении ДВ за пределами каустической поверхности взаимодействие происходит через волны излучения из ДВ. В результате обеспечивается связь с $p < 1$ (слабая связь). Коэффициент передачи волн по ДВ в условиях критической связи достигает своего минимального значения из-за эффективного «поглощения» энергии резонатором. В этом случае собственная добротность КДР в два раза выше его нагруженной добротности, т.е. $Q_0 = 2Q_n$. Изменяя прицельное расстояние δ между криволинейной поверхностью КДР и ДВ можно управлять эффективностью связи p (рис. 1.2 в). Расстояние δ , при котором достигается критическая связь, может служить оценочным параметром добротности исследуемого резонатора.

Необходимо отметить, что, несмотря на распределенный характер связи КДР с ДВ, последний представляет собой неоднородность, которая искажает распределение полей мод ШГ в резонаторе. В связи с этим важной задачей при проведении экспериментальных исследований является правильный выбор параметра связи путем подбора параметров ДВ и прицельного расстояния.

Работы, проведенные в этом направлении [68, 145, 146], показали, что при определенных условиях влияние ДВ, размещенного вблизи криволинейной поверхности КДР, влияние элемента возбуждения на формирование электродинамических характеристик открытых КДР в режиме вынужденных мод ШГ может быть существенным. В первую очередь такое влияние негативно отражается на величине добротности исследуемых резонаторов с модами ШГ.

Кроме связи КДР с ДВ, к используемым способам распределенной связи в оптическом диапазоне следует отнести связь цилиндрических КДР с призмой [147], и возбуждение мод ШГ в шаровых КДР, расположенных в поле волноводного излучателя [107, 143]. По сравнению с использованием локальных элементов связи и распределенной связи КДР с ДВ эти способы возбуждения используются реже, поскольку их возможности по изменению параметра связи в широких пределах ограничены.

Переходя к описанию известных способов возбуждения мод в экранированных КДР, следует отметить, что в силу конструктивных особенностей таких резонаторов (весь объем или его часть закрыты), большинство описанных способов возбуждения для них неприменима либо их возможности существенно ограничены. Так малоприменима распределенная связь экранированных диэлектрических структур с ДВ. Также ограничены возможности использования локальных элементов связи. В первую очередь для экранированных КДР неприемлемо возбуждение колебаний открытым концом прямоугольного металлического волновода со стороны криволинейной поверхности диэлектрических резонансных структур. Главным методом возбуждения экранированных диэлектрических резонаторов является используемое до сих пор введение локального элемента связи в замкнутый объем резонатора через отверстия в металлическом экране. Получили широкое распространение штыревые антенны и индуктивные петли связи для возбуждения низших типов колебаний [121, 122, 149]. Для

возбуждения мод ШГ в экранированных КДР использовалась щель связи в плоском металлическом зеркале резонатора [127-130,150].

Однако все перечисленные способы возбуждения экранированных диэлектрических резонаторов, использующих режимы как низших, так и высших типов колебаний, обладают одним важным недостатком. Во всех перечисленных случаях локальный элемент связи, расположенный внутри резонансного объема, является возмущающей неоднородностью. Его влияние негативно сказывается на поведении энергетических и спектральных характеристик экранированных резонаторов. В работах [132, 133, 150] было показано, что спектр колебаний экранированных КДР сферической формы, возбуждаемых щелью связи в зеркале, густой. Это наглядно демонстрирует спектрограмма, представленная на рис. 1.3 а, представленная в работе [133]. Показан участок частотного спектра экранированного двухслойного (диэлектрик-воздух-металл) полушарового экранированного КДР. Радиусы диэлектрического полушара (тефлон) и металлического экрана (алюминий) сферической формы составляли $R_1 = 39$ мм и $R_2 = 42$ мм соответственно. Именно при таких соотношениях диэлектрической резонансной структуры и металлического экрана, как было указано выше, существуют «сверхвысокодобротные» моды ШГ. Возбуждение колебаний в таком резонаторе осуществлялось в 8-мм диапазоне длин волн щелью связи размерами $7,2 \times 0,5$ мм². Элемент связи располагался внутри экранированного КДР в области диэлектрика на расстоянии 2 мм от его края (в области полей мод ШГ).

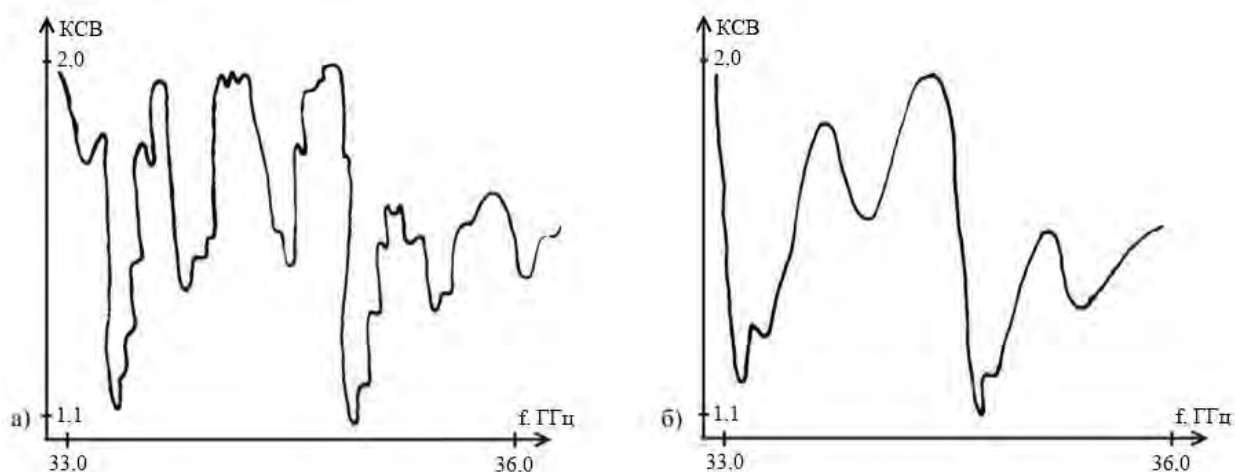


Рис. 1.3. Спектры двухслойного полушарового экранированного КДР на сплошном зеркале (а) и на локальных зеркалах (б) в режиме возбуждения мод ШГ щелью связи, расположенной внутри резонатора.

Из рис. 1.3 а видно, что спектр вынужденных колебаний такого резонатора настолько густой, что на отдельных участках резонансные отклики, соответствующие различным типам колебаний перекрываются, что затрудняет их идентификацию. По причине слабой направленности излучения из щели связи в спектре полушарового экранированного КДР присутствуют колебания, имеющие различную структуру поля. Помимо мод ШГ в нем могут присутствовать лучевые колебаний и колебания типа «бильярд». Их поля глубже локализируются в области диэлектрика по сравнению с полями мод ШГ. В работах [132, 150] был предложен способ разрежения спектра такого резонатора путем замены сплошного металлического зеркала системой двух локальных зеркал, которые покрывали лишь частично плоскую поверхность диэлектрического полушара, а именно область локализации полей мод ШГ. Спектр такого резонатора представлен на рис. 1.3б. Видно, что по сравнению с полностью экранированным КДР спектр такого резонатора разрежен. Благодаря высоким радиационным потерям энергии лучевые колебания, поля которых локализованы вблизи центра плоского основания полушара, не возбуждаются. Однако полностью разредить его спектр с исключительным выделением мод ШГ не удастся. Помимо мод ШГ в спектре полушарового

экранированного КДР с локальными зеркалами присутствуют лучевые колебания, поля которых имеют общие области локализации с полями мод ШГ.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 1

Проведенный обзор результатов исследований по данным литературных источников позволяет сделать вывод о необходимости проведения исследований электродинамических характеристик экранированных КДР. Перспективность таких исследований продиктована двумя факторами. Во-первых, подобные резонаторы экспериментально изучены недостаточно. Во-вторых, по сравнению с другими резонаторами, используемыми в мм диапазоне длин волн они обладают рядом преимуществ. К ним следует отнести высокую помехозащищенность и возможность достижения высокой добротности в силу физических особенностей мод ШГ, возбуждаемых в них. Однако нерешенными остаются некоторые принципиальные задачи. Главными из них являются поиск оптимальных с точки зрения высокой добротности форм экранированных КДР, улучшение их спектральных характеристик и использование новых способов возбуждения мод в экранированных диэлектрических резонансных структурах. В Разделе 1 показано, что главным недостатком существующих способов возбуждения мод ШГ в экранированных КДР, является возмущение резонансного поля неоднородностью в виде элемента возбуждения (связи). Это приводит к негативным проявлениям, главным из которых является ухудшение добротности.

Решению представленных выше задач посвящена данная диссертационная работа.

РАЗДЕЛ 2. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ МОД ШГ В ЭКРАНИРОВАННЫХ КДР НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В разделе 1 была аргументирована целесообразность использования экранированных КДР с модами ШГ в технике мм волн для решения задач частотной селекции. Как было показано выше, данные резонаторы изучались в основном с помощью численных методов исследований [126-129]. Результаты экспериментальных исследований электродинамических характеристик экранированных КДР в настоящее время недостаточно. По-видимому, это связано с трудностями, возникающими из-за высокой густоты их спектра. Так в работах [131, 133, 134] было показано, что спектр колебаний экранированного полушарового КДР, расположенного на плоском металлическом зеркале и возбуждаемого локальным элементом связи в виде щели в зеркале, настолько густой, что на отдельных участках спектра резонансы, соответствующие разным модам и типам колебаний, перекрываются. Это сильно затрудняет их идентификацию и делает почти невозможным исследование энергетических характеристик резонатора. Частично разрядить спектр колебаний позволяет переход от сплошного зеркала к системе локальных зеркал [133]. Однако, использование локальных зеркал, тем не менее, не позволяет достаточным для приоритетного выделения мод ШГ образом разрядить спектр колебаний экранированных КДР. Наряду с модами ШГ в таких резонансных системах возбуждаются и лучевые колебания.

Важную роль в формировании спектральных характеристик экранированных КДР играют способы возбуждения резонансных колебаний. Как было показано в разделе 1, все существующие способы возбуждения колебаний в таких резонаторах используют локальный элемент связи. Его главным недостатком является широкая диаграмма направленности излучения. В закрытых резонаторах именно это является причиной

одновременного возбуждения колебаний с различным распределением резонансных полей, что приводит к существенному сгущению спектра.

Вторым важным недостатком экранированных КДР, как было показано в разделе 1, является сравнительно невысокая добротность. Теоретически в работах [128,129] было показано, что наличие проводящей поверхности в конструкции таких резонаторов приводит к ухудшению их собственной добротности по причине высоких омических потерь энергии резонансного поля. Однако комплексных экспериментальных исследований по установлению причин ухудшения добротности КДР при их экранировании ранее проведено не было. Основываясь на экспериментальных работах по изучению электродинамических характеристик открытых КДР [145, 146], можно предположить, что существенную роль в формировании энергетических характеристик экранированных КДР играет выбор элемента связи и условий возбуждения колебаний в них.

Поэтому наиболее важными экспериментальными задачами по изучению электродинамических характеристик экранированных КДР является улучшение их спектральных и энергетических характеристик путем использования новых способов возбуждения.

2.1.Разрежение спектра полудискового и полушарового экранированных КДР путем использования планарного волновода.

Результаты исследований открытых КДР разной формы показали, что наиболее привлекательным с точки зрения спектральных характеристик является резонатор на основе диэлектрической структуры в виде полудиска, размещенного на плоском металлическом зеркале. В спектре его колебаний присутствуют моды, отличающиеся лишь значением азимутального индекса n . В отличие от резонаторов других форм радиальный и аксиальный индексы мод ШГ в таком резонаторе постоянны $m=l=1$. С точки зрения чистоты спектра

полудискового резонатора используем данную структуру для изучения спектральных характеристик экранированных КДР.

Полудисковый экранированный КДР показан на рис. 2.1. Он включает в себя диэлектрический полудиск 1, изготовленный из фторопласта-4 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,08$, радиусом $R_1 = 39$ мм и высотой $H = 7,2$ мм. Диэлектрический полудиск частично экранирован со стороны криволинейной поверхности и одного плоского бокового основания. Экран цилиндрической формы 2 выполнен из алюминия радиусом $R_2 = R_1$. Диэлектрический полудиск и металлический экран плоскими основаниями располагались на плоском сплошном проводящем зеркале 3 (латунь), выполненном в виде квадрата со стороной 110 мм.

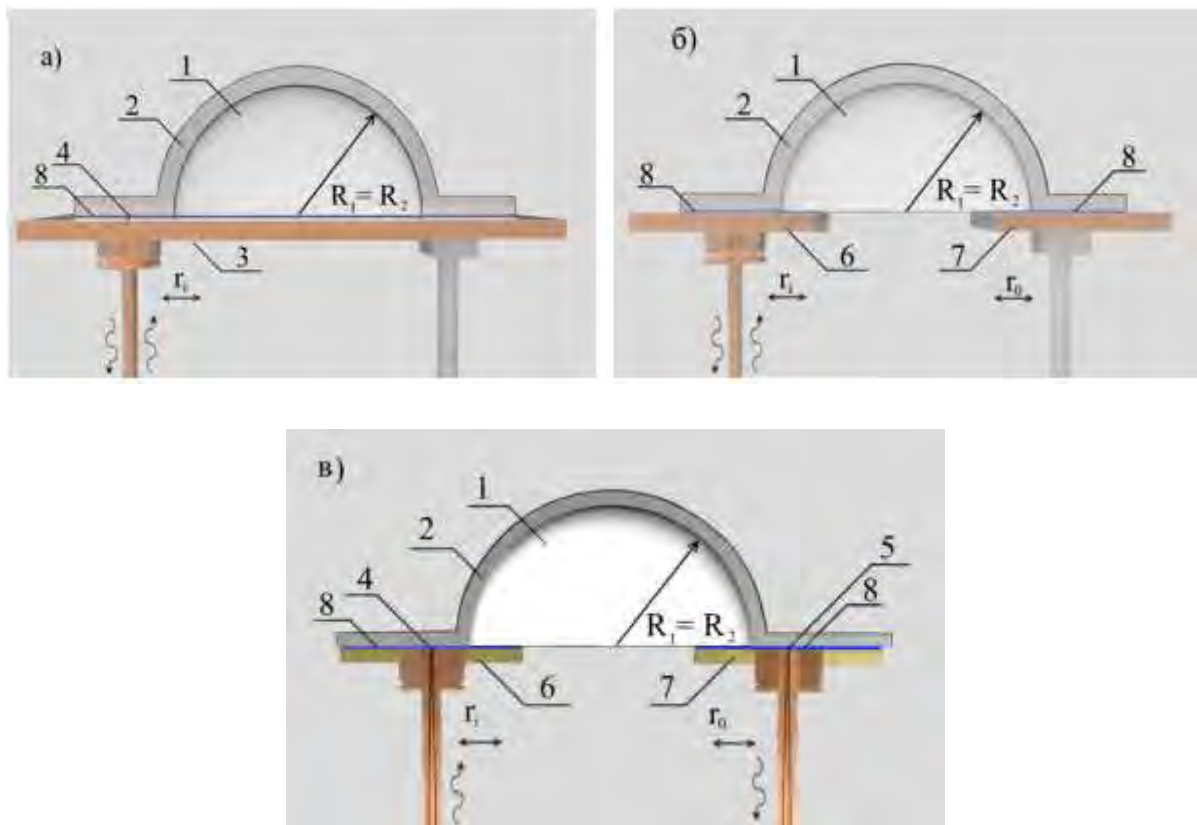


Рис. 2.1. Схемы включения полудискового экранированного КДР со сплошным зеркалом (а) и с локальными зеркалами (б, в) во внешнюю цепь: «на отражение» (а, б) и «на проход» (в).

В эксперименте использовалось два способа включения экранированного КДР в цепь волноводный тракт: методом «на отражение» (рис. 2.1а, б) и методом «на проход» (рис. 2.1в). При использовании схемы «на отражение» для подвода энергии от внешнего источника к резонатору и вывода энергии из него применялся один и тот же элемент связи. В случае схемы «на проход» подвод и вывод энергии из резонатора осуществляется посредством двух локальных элементов связи. Элементами связи, используемыми как в схеме «на отражение», так и в схеме «на проход», служили щели 4 и 5 в проводящем зеркале 3 резонатора. Каждая из них представляла собой конец суженного вдоль узой стенки прямоугольного полого металлического волновода. В эксперименте использовались щели связи с размерами $7,2 \times 0,5 \text{ мм}^2$. Подвод энергии к исследуемому резонатору осуществлялся от широкополосного источника типа ЛОВ в составе панорамного измерителя КСВН Р2-65. В эксперименте имелась возможность изменять радиальную координату щели связи r_i путем смещения экранированного КДР на проводящем зеркале вдоль радиальной координаты. Началом отсчета $r_i = 0$ радиальной координаты щели связи возбуждения будем считать середину плоского основания диэлектрического элемента экранированного резонатора.

Для разрежения спектра исследуемого экранированного КДР применялась система локальных металлических зеркал, предложенная в работе [133]. Для этого сплошное металлическое зеркало 3 рис 2.1а заменялась двумя локальными проводящими зеркалами 6 и 7 рис.2.1б. Локальные зеркала имели форму квадрата со стороной 50 мм. По радиальной координате они располагались таким образом, чтобы покрыть лишь область локализации полей мод ШГ в экранированном КДР – 12 мм от границы раздела сред диэлектрик-металл, вглубь диэлектрика. Система локальных зеркал использовалась в эксперименте как в схеме «на отражение», так и в схеме «на проход».

Экспериментальные исследования были проведены в полосе частот $29 \div 37$ ГГц. Исследовались спектральные и энергетические характеристики экранированного резонатора в режиме возбуждения *EH*-колебаний. Для этого щели связи ориентировались таким образом, чтобы их широкая стенка была перпендикулярна плоским основаниям экранированного полудиска. Предметом исследований служили резонансные частоты, уровни КСВН на резонансных частотах (параметр связи) при использовании схемы «на отражение», значения коэффициента ослабления сигнала (коэффициент прохождения) при использовании схемы «на проход», а также поляризационные свойства мод ШГ в экранированном КДР. Данные величины позволяли определять при используемых схемах включения резонатора во внешнюю цепь значения собственной добротности Q_0 (схема «на отражение») и нагруженной добротности Q_n (схема «на проход»). Для идентификации возбуждаемых в резонаторе различных типов колебаний и качественной оценки потерь на резонансных частотах экранированных КДР исследовались распределения интенсивности резонансных полей вдоль радиальной координаты. Для этого в схеме «на отражение» рис. 2.1б использовался метод малой возмущающей неоднородности – пассивной щели в подвижном локальном зеркале 7, в схеме «на проход» - подвижным зондом в виде щели связи 5 вывода энергии (рис. 2.1в).

При использовании схемы «на отражение» щель связи располагалась на расстоянии 2 мм от края диэлектрического полудиска. В дальнейшем для описания положения щели связи по радиальной координате будем пользоваться относительной величиной r_i/R_2 . Таким образом, в эксперименте ее значение составляло $r_i/R_2 \approx 0,95$. Спектр резонансных частот экранированного полудискового КДР в полосе $33,5 \div 35,7$ ГГц представлен на рис. 2.2б. Для сравнения на рис. 2.2а показан спектр подобного открытого диэлектрического резонатора при тех же условиях его возбуждения.

Из рис. 2.2б видно, что спектр колебаний, возбуждаемых в экранированном КДР, в отличие от спектра подобного открытого резонатора

настолько густой, что во всей выделенной полосе частот идентификация мод колебаний и измерение их электродинамических характеристик практически невозможны.

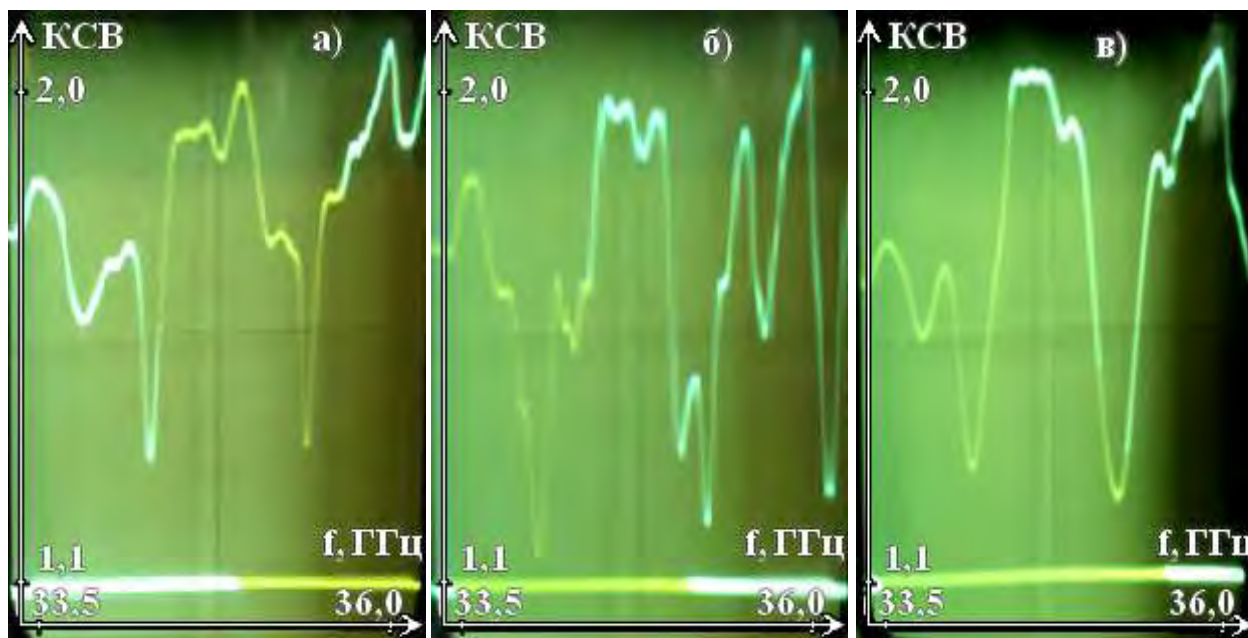


Рис. 2.2. Спектры резонансных частот открытого (а) и экранированного полудискового КДР со сплошным зеркалом (б), с локальными зеркалами (в), возбуждаемых щелью связи по схеме «на отражение».

Можно предположить, что наряду с модами ШГ, в экранированном КДР возбуждаются колебания с другим распределением резонансного поля, такие как лучевые и типа «бильярд». Экспериментально было установлено, что одновременно с модами ШГ преимущественной *EH*-поляризации возбуждаются и колебания *HE*-поляризации.

Существенно разредить спектр колебаний экранированного КДР и выделить моды ШГ позволяет переход к системе локальных зеркал (рис. 2.2в). Однако, как показали результаты проведенных исследований, наряду с модами ШГ *EH*-поляризации в спектре такого резонатора присутствуют и моды *HE*-поляризации, что, по-видимому, связано с отклонением форм резонатора от идеальных и возможным нарушением расположения щели связи относительно поверхности диэлектрического полудиска.

Полученные спектральные характеристики полудискового экранированного КДР при использовании локальных зеркал позволяют классифицировать возбуждаемые моды ШГ. Итак, в спектре данного резонатора приоритетно присутствуют низшие радиальные и аксиальные моды EH - поляризации, для которых значения соответствующих индексов составляют $m=l=1$. Резонансные кривые, представленные на рис. 2.2 в соответствии модам, которые отличаются на единицу значением азимутального индекса n . Во всей исследуемой полосе частот наблюдаются периодические последовательности подобных резонансов, которые устанавливают сетку резонансных частот. Период сетки резонансных частот экранированного полудискового КДР составляет $\Delta f_n \approx 0,89$ ГГц, а подобного открытого резонатора - 0,92 ГГц. Кроме того, при экранировании диэлектрического полудиска резонансные частоты колебаний смещаются в среднем на 280 МГц в сторону более низких частот. Таким образом, наличие проводящих поверхностей в конструкции КДР приводит к заметным изменениям его спектральных характеристик.

Из рис. 2.2 видно, что по сравнению с открытым диэлектрическим резонатором, эффективность возбуждения мод ШГ в экранированном КДР с точки зрения величины параметра связи возрастает. Представленные спектры открытого и экранированного диэлектрических резонаторов относятся к случаю слабой связи ($p < 1$) с ними. Однако, как видно, экранирование диэлектрической резонансной структуры проводящими поверхностями приводит к заметному ухудшению добротности резонатора, что проявляется в увеличении ширины резонансной кривой.

Подобные спектральные характеристики экранированного полудискового КДР были получены и при использовании схемы «на проход» (рис. 2.3а). В отличие от схемы «на отражение» выделить в спектре колебаний моды ШГ при использовании схемы «на проход» позволяет расположение элемента вывода энергии в области локализации их резонансных полей. Однако, как видно, форма резонансных кривых искажена. На близких

резонансных частотах с модами ШГ EH -поляризации возбуждаются моды HE -поляризации. Эффективность возбуждения последних меньше эффективности возбуждения мод приоритетной EH -поляризации. Однако их присутствие в спектре приводит к искажению формы резонансной кривой и ее «размытию»

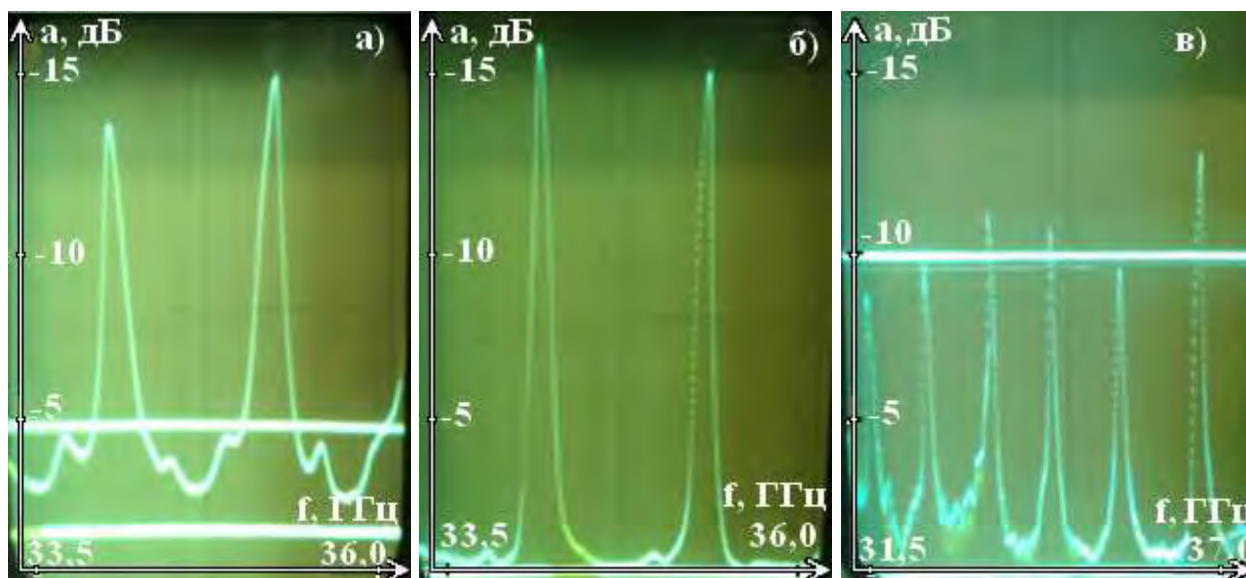


Рис. 2.3. Спектры резонансных частот полудискового экранированного КДР, возбуждаемого щелью связи (а), планарным волноводом в интервале частот шириной 2,2 ГГц (б), 5,5 ГГц (в) (схема «на проход»).

Необходимо отметить, что абсолютные значения резонансных частот и форма резонансных кривых зависят от расположения щелей связи вдоль радиальной координаты. Как было показано в работах по изучению свойств открытых КДР, локальный элемент связи в виде щели может существенно возмущать резонансные поля колебаний, особенно при его расположении на участках полей с высокой интенсивностью. Наиболее «чистый» спектр колебаний исследуемого резонатора наблюдался при расположении как щели связи подвода энергии, так и щели связи вывода энергии из резонатора в области границы раздела сред диэлектрик-металл.

Несмотря на то, что часть щели связи располагалась даже под металлическим элементом резонатора эффективность возбуждения мод ШГ в исследуемом экранированном КДР оставалась высокой. При смещении локального элемента связи в область между плоскостью металлического

зеркала и плоскостью металлического экрана (за пределами резонатора) в эксперименте не приводило к заметному снижению амплитуды резонанса. Мало того, спектр исследуемого резонатора становился более «чистым» при относительной радиальной координате щели связи подвода энергии $r_i/R_2 > 1$. Характерный спектр экранированного полудискового КДР, возбуждаемого щелью связи, расположенной за пределами резонансного объема $r_i/R_2 \approx 1,05$ показан на рис. 2.3 б. При более детальном рассмотрении оказалось, что между плоскостью металлического зеркала и плоскостью металлического экрана существует естественный тонкий щелевой зазор, толщина которого составляет несколько десятков микрон. При дальнейшем смещении щели связи вдоль зазора на расстояние, даже превышающее длину волны $r_i/R_2 \approx 1,25$ (10 мм), на экране панорамного измерителя КСВН резонансы продолжали наблюдаться. Интересно, что при использовании схемы «на проход», высокая эффективность возбуждения мод ШГ в исследуемом резонаторе сохранялась и при расположении щели связи вывода энергии в таком зазоре. Из этого можно сделать вывод, что такой тонкий щелевой зазор в конструкции экранированного КДР обладает волноведущими свойствами, несмотря на то, что его высота много меньше длины волны. Область локализации электромагнитного поля в такой волноведущей линии ограничена двумя проводящими пластинами, длина и ширина которых намного превосходят длину волны. Такая конструкция волноведущей линии позволяет рассматривать ее как планарный волновод (рис. 2.4), известный в научной литературе [151, 152].

Главным критерием планарности такой волноведущей структуры является отношение ее высоты h к длине волны λ . В данной работе такое отношение рассматривается в пределах $h/\lambda \approx 0,01 \div 0,2$, что хорошо согласуется с литературными данными о планарных волноводах [150], используемых в мм диапазоне длин волн. В дальнейшем будем пользоваться именно такой терминологией — «планарный волновод», несмотря на то, что в опубликованных работах по теме диссертации [11-18] нами ранее

использовался термин «щелевая линия» в силу некоторого сходства волноведущей линии со щелевой линией [153].

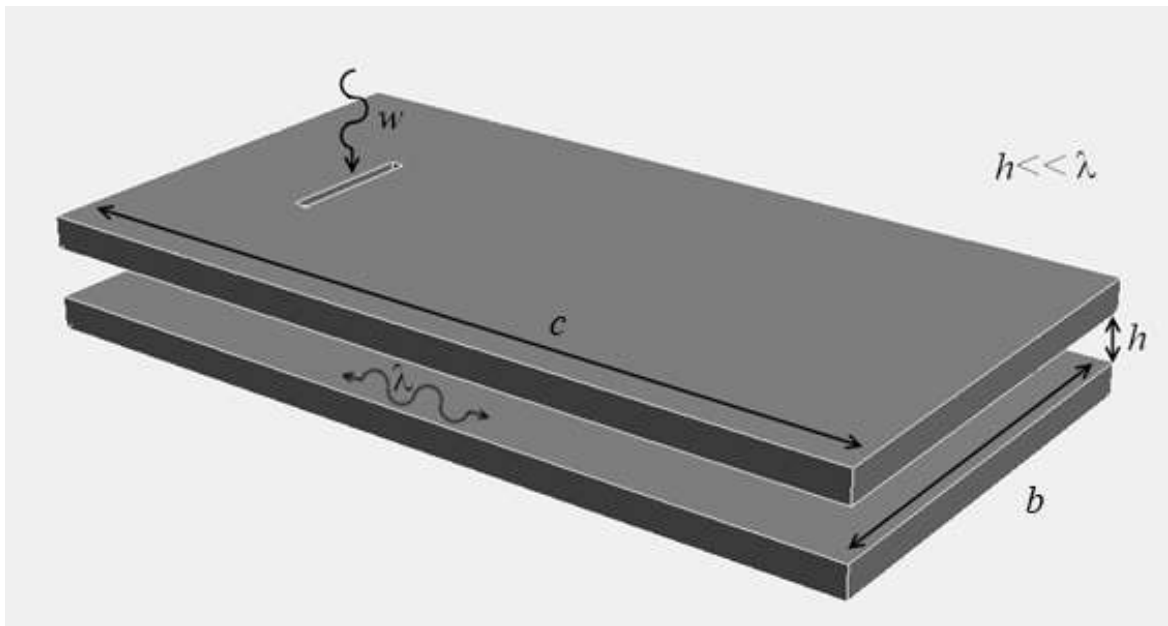


Рис. 2.4. Схематическое представление планарного волновода со щелью связи возбуждения.

На рис. 2.4 представлен планарный волновод 8 (см. рис. 2.1) в виде тонкого зазора между плоскостями металлического зеркала и металлического экрана резонатора. В эксперименте имелась возможность увеличивать высоту h планарного волновода, начиная с 50 мкм. Планарному волноводу с $h \approx 50$ мкм соответствует естественный зазор.

Селективность поляризационных свойств используемого в данной работе планарного волновода при возбуждении экранированного полудискового КДР послужила причиной наиболее «чистого» спектра. В отличие от возбуждения мод ШГ в экранированных КДР щелью связи использование планарного волновода не приводит к появлению «паразитной» HE -поляризации. При повороте щели связи внутри планарного волновода на 90° , т.е. при использовании преимущественной HE -поляризации колебания в экранированном полудисковом КДР не возбуждаются. О хороших пропускных способностях рассматриваемого планарного волновода в

широкой полосе частот свидетельствует спектр колебаний исследуемого резонатора (рис. 2.3 в). Видно, что коэффициент прохождения сигнала на резонансных частотах экранированного КДР мало зависит от выбора рабочей частоты.

Исследование спектральных характеристик полудискового экранированного КДР было проведено и путем компьютерного моделирования с помощью стандартного пакета программного обеспечения CST Microwave Studio 2011. Данная программа позволила определить собственные частоты исследуемого резонатора и оценить распределения резонансных полей колебаний в нем. Характерная для мод ШГ картина распределения полей в полудисковом экранированном КДР представлена на рис. 2.5. Для исследований выбиралась мода EH_{n11} , возбуждаемая планарным волноводом на частоте $f_n \approx 35,7$ ГГц. Щель связи располагалась за пределами резонатора в планарном волноводе на расстоянии 3 мм от границы раздела сред диэлектрик-металл ($r_i/R_2 = 1,08$).

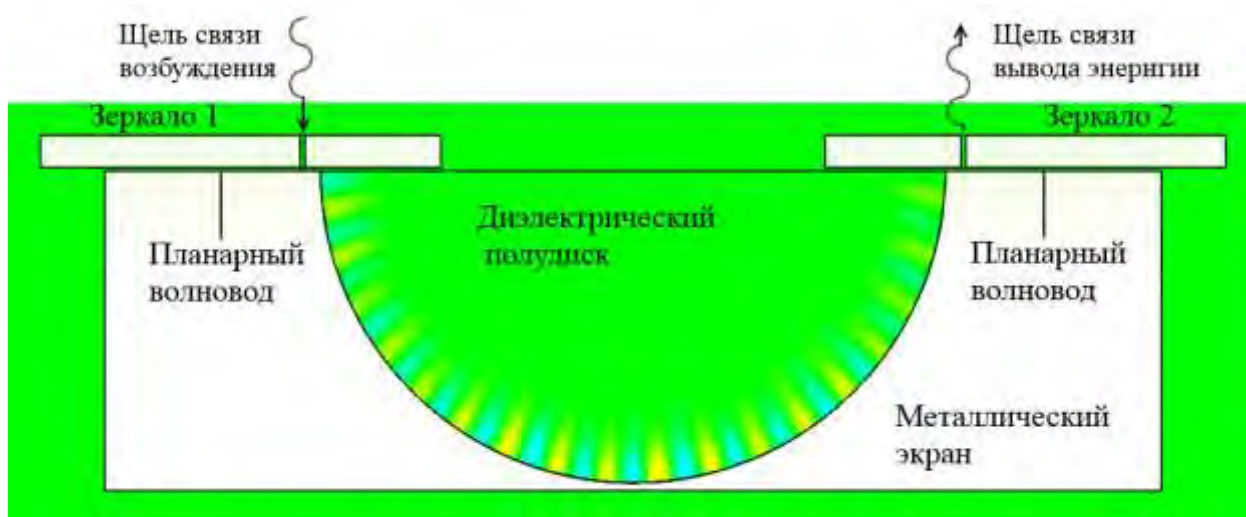


Рис. 2.5. Азимутальное распределение поля $EH_{36\ 1\ 1}$ моды ШГ в полудисковом экранированном КДР, возбуждаемом планарным волноводом на частоте $f_n \approx 35,7$ ГГц (CST Microwave Studio 2011).

Видно характерное для мод ШГ распределение резонансного поля вдоль азимутальной координаты с узлами поля, расположенными вблизи

криволинейной поверхности диэлектрического полудиска. Данная программа позволяет определить величину азимутального индекса мод ШГ путем подсчета вариаций поля. Для представленной на рис. 2.5 моды ШГ величина азимутального индекса составляет $n = 36$.

Сравнение абсолютных значений резонансных частот колебаний, возбуждаемых в экранированной диэлектрической резонансной структуре планарным волноводом, полученных расчетным и экспериментальным путем, показало хорошее соответствие между ними. Наибольшее различие в исследуемой полосе частот не превышает 60 МГц, что по отношению к периоду сетки резонансных частот ($\Delta f_n \approx 0,89$ ГГц) составляет менее 7%.

Исследования открытых КДР, возбуждаемых щелью связи, показали, что расположение локального элемента связи в области локализации резонансных полей рабочих колебаний приводит к изменению собственных частот резонаторов. При этом существенное значение имеет выбор места расположения щели связи в резонаторе. Подобные исследования зависимости значения резонансных частот мод ШГ в экранированных КДР от условий их возбуждения ранее не проводились.

На рис. 2.6 представлена зависимость резонансной частоты $f_n \approx 36,5$ ГГц полудискового экранированного КДР от относительной радиальной координаты r_i/R_2 середины щели связи возбуждения (подвода энергии) при фиксированном положении щели связи вывода энергии $r_0/R_2 = 1$. Данная величина r_i/R_2 соответствует возбуждению мод ШГ в полудисковом экранированном КДР планарным волноводом (щель связи возбуждения за пределами резонатора).

Видно, что при расположении щели связи возбуждения внутри резонатора, она оказывает сильное влияние на поведение резонансной частоты. При изменении ее положения в области локализации поля моды ШГ $r_i/R_2 = 0,91 \div 1$ резонансная частота изменяется на 33 МГц с тенденцией роста при уменьшении значения величины r_i/R_2 . В то же время при смещении щели связи вывода энергии за пределы резонатора в планарный волновод значение

резонансной частоты близко к постоянному. Видно, что при ее положениях в интервале значений относительной радиальной координаты $r_i/R_2 = 1 \div 1,21$, резонансная частота почти не меняет своего значения.

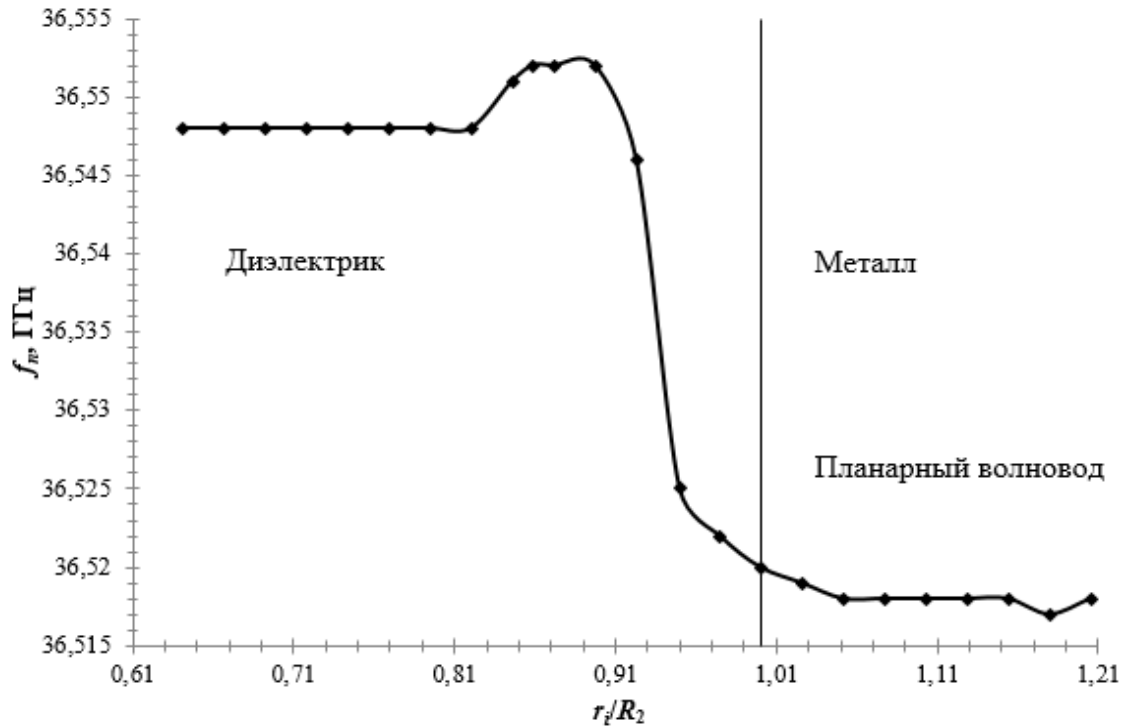


Рис. 2.6. Зависимость частоты полудискового экранированного КДР от относительной радиальной координаты щели связи возбуждения.

Наряду с исследованиями спектральных и частотных характеристик полудискового экранированного КДР в работе были проведены исследования подобного полушарового экранированного резонатора, расположенного на одном сплошном либо двух локальных металлических зеркалах согласно рис. 2.1. Диэлектрический полушар был выполнен из того же материала (тефлон), что и полудиск, и имел тот же радиус R_1 кривизны. Он помещался в полость со сферическим типом криволинейной поверхности $R_2 = R_1$ в металле. Для возбуждения мод ШГ в таком резонаторе использовалась щель связи и планарный волновод. По аналогии с полудисковым экранированным КДР использовались схемы «на отражение» и «на проход».

Проведенные с полушаровым экранированным КДР исследования показали, что, как и в случае с полудисковым резонатором, спектр колебаний,

возбуждаемых щелью связи со стороны диэлектрического элемента резонатора густой. Вместе с TM -модами ШГ возбуждались и колебания с иным распределением поля (лучевые и типа «бильярд»), а также моды TE -поляризации. Кроме того, по аналогии с открытыми полушаровыми КДР, расположение локальной неоднородности в виде щели связи в резонаторе приводило к частичному снятию вырождения, что проявлялось в «расщеплении» резонансной кривой на два резонанса с близкими частотами (рис. 2.7 а).

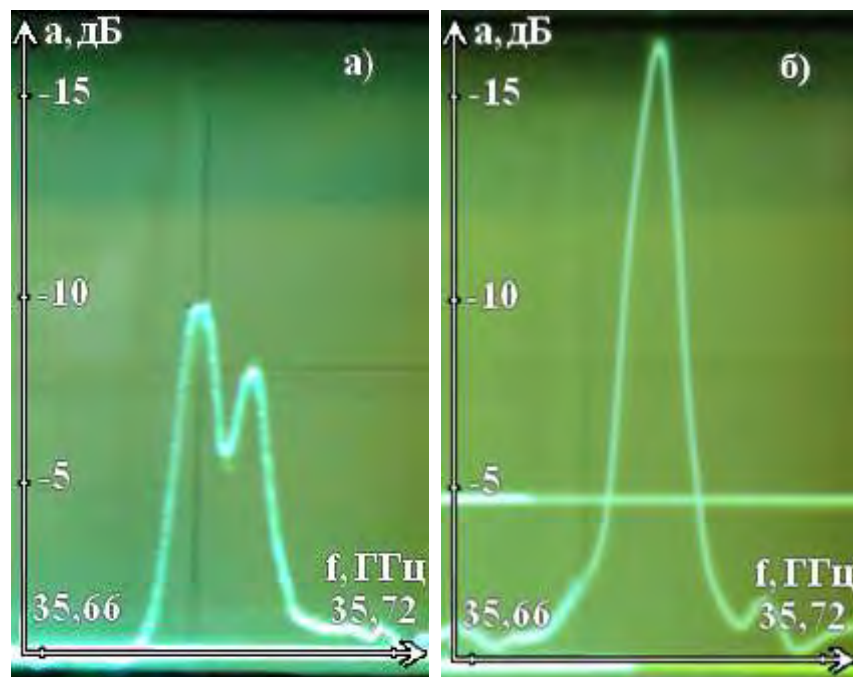


Рис. 2.7. Спектры полушарового экранированного КДР, возбуждаемого щелью связи (а) и планарным волноводом (б), в интервале частот шириной 120 МГц (схема «на проход»).

Спектр, показанный на рис. 2.7а соответствует возбуждению полушарового экранированного КДР щелью связи с относительной радиальной координатой $r_i/R_2 \approx 0,95$. Была использована схема включения резонатора во внешнюю цепь «на проход». Щель связи вывода энергии из резонатора также располагалась внутри резонатора в области локализации полей мод ШГ и имела относительную радиальную координату $r_0/R_2 \approx 0,95$. В разделе 1 было показано, что в отличие от резонаторов с цилиндрическим

типом криволинейной поверхности моды ШГ в шаровом и полушаровом КДР вырождены по частоте. На одинаковых частотах существуют моды с разным значением азимутального индекса.

Решить данную проблему позволяет применение планарного волновода. При расположении локального элемента связи за пределами экранированного резонатора снятия вырождения не наблюдается (рис. 2.7б) по причине отсутствия возмущения резонансного поля локальными неоднородностями. Об этом свидетельствует симметричная форма резонанса. Данные, приведенные на рис. 2.7б соответствуют расположению щелей связи подвода и вывода энергии в точках с относительными радиальными координатами $r_i/R_2 = r_0/R_2 \approx 1,08$. Кроме того, использование планарного волновода позволяет возбуждать в полушаровых экранированных КДР только моды ШГ *ТМ*-поляризации,

Таким образом, экспериментально и путем компьютерного моделирования показаны преимущества использования планарного волновода для возбуждения мод ШГ в экранированных КДР разной формы по сравнению с известным методом возбуждения - щелью связи в металлическом зеркале резонаторов. К ним следует отнести: разрежение спектров от «паразитных» типов колебаний, таких как, лучевые колебания и типа «бильярд»; выделение преимущественной *ЕН*-поляризации в резонаторах с цилиндрическим типом криволинейной поверхности и *ТМ*-поляризации в полушаровых экранированных КДР. При этом положение щели связи в планарном волноводе не оказывает возмущающего влияния на поведение резонансных частот колебаний.

К недостаткам использования планарного волновода следует отнести ограничения его использования относительно схемы включения резонатора. Он может быть использован только при включении резонатора по схеме «на проход». Попытки использования схемы «на отражение» показали, что обратное излучение в волноводный тракт при отражении от металлической стенки планарного волновода (при естественной высоте $h < 100$ мкм)

настолько велико, что выделить резонансы на фоне сильных помех, практически невозможно в широком интервале изменения радиальной координаты щели связи. Резонансы при использовании схемы «на отражение» наблюдаются лишь при расположении щели связи в планарном волноводе вблизи границы резонатора в узком интервале изменения величины $r_i/R_2 = 1 \div 1,1$. В этой области излучение из щели связи, по-видимому, захватывает область резонансного объема внутри металлического экрана.

2.2. Зависимость энергетических характеристик полудискового и полушарового экранированных КДР от способов их возбуждения.

В подразделе 2.1 данной работы было показано, что спектральные характеристики экранированных КДР с модами ШГ, имеющих цилиндрическую и сферическую формы криволинейной поверхности, во многом определяются условиями их возбуждения на модах ШГ. Использование локального элемента связи в виде щели, расположенной в резонаторе приводит к сдвигу резонансной частоты и изменению спектра колебаний. Наиболее привлекательным является использование планарного волновода, т.е. случай, когда щель связи располагается за пределами резонатора и нагружается на тонкий щелевой зазор, образованный проводящими поверхностями плоского зеркала и основания экрана КДР. Не менее интересными являются задачи определения влияния различных способов возбуждения мод ШГ в исследуемых резонаторах на поведение их энергетических характеристик, в первую очередь на величину добротности. Кроме того, вызывает интерес исследование амплитудно-частотных характеристик экранированных КДР разной формы.

Перспективным для проведения исследований с точки зрения наилучшей чистоты спектра, как было показано в подразделе 2.1, является использование схемы «на проход». При этом объектом исследования являются значения коэффициента ослабления (прохождения) сигнала на выходе резонатора на резонансных частотах и величина нагруженной добротности.

При сравнении между собой энергетических характеристик экранированных КДР разной формы и подобных открытых КДР исследование данных величин является достаточным для качественной оценки поведения их собственных добротностей. Необходимо отметить, что для проведения сравнительного анализа различных по форме резонансных структур использовались идентичные условия их возбуждения, а именно, одинаковые щели связи с фиксированными радиальными координатами.

Информативной с позиции оценки эффективности возбуждения параметра связи мод ШГ в исследуемом (см. подраздел 2.1) полудисковом экранированном КДР является зависимость относительной амплитуды сигнала A_0/A_{max} на резонансной частоте на выходе резонатора от относительной радиальной координаты r_i/R_2 середины щели связи возбуждения (подвода энергии). Данная зависимость представлена на рис. 2.8 кривой 1. Она позволяет судить о поведении коэффициента передачи при различных положениях щели связи возбуждения вдоль радиальной координаты. При использовании схемы «на проход» щель связи вывода энергии располагалась на границе раздела сред диэлектрик-металл ($r_0/R_2 = 1$). Данные, представленные на рис. 2.8 соответствуют резонансной частоте $f_n \approx 36,5$ ГГц.

Видно, что наибольшая связь с полудисковым экранированным КДР достигается при расположении щели связи возбуждения вблизи границы диэлектрического полудиска ($r_i/R_2 = 0,98$). Следует ожидать, что именно такой радиальной координате щели связи возбуждения соответствует положение максимума интенсивности резонансного поля моды ШГ. При уменьшении радиальной координаты щели связи возбуждения относительная амплитуда резонанса плавно понижается до минимальных значений.

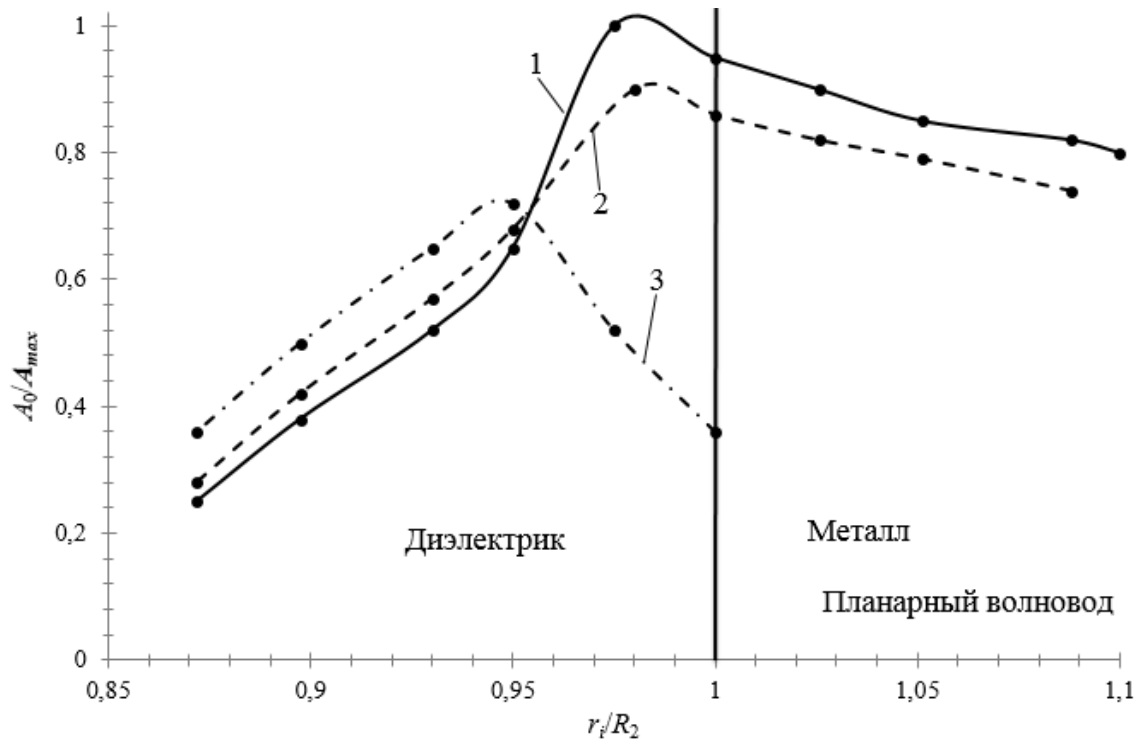


Рис. 2.8. Зависимость относительной амплитуды резонанса от относительной радиальной координаты щели связи возбуждения для полудискового экранированного КДР (1), полушарового экранированного КДР (2) и открытого полудискового КДР (3).

Наибольший интерес представляют собой данные о поведении амплитуды резонанса (коэффициента передачи) при расположении щели связи возбуждения за пределами резонатора, а именно, в планарном волноводе. Видно, что даже при $r_i/R_2 > 1$ эффективность возбуждения мод ШГ в полудисковом экранированном КДР высока. Об этом свидетельствуют высокие значения относительной амплитуды резонанса. Так при расположении щели связи возбуждения в точке с $r_i/R_2 = 1,03$ амплитуда резонанса лишь на 10% меньше ее максимального значения, достигаемого при расположении щели связи возбуждения внутри резонатора. Высота h планарного волновода составляла $h \approx 100$ мкм.

На рис. 2.9 показана зависимость нагруженной добротности Q_n полудискового экранированного КДР (сплошная кривая 1) от относительной радиальной координаты r_i/R_2 середины щели связи на частоте $f_n \approx 36,5$ ГГц.

Также как и при исследовании эффективности возбуждения мод ШГ в полудисковом экранированном резонаторе щель связи вывода энергии располагалась на границе раздела сред диэлектрик-металл ($r_0/R_2 = 1$).

Видно, что представленная зависимость нагруженной добротности имеет немонотонный характер с выраженным минимумом $Q_n \approx 1750$, соответствующим расположению щели связи возбуждения в резонаторе вблизи границы раздела сред диэлектрик-металл. Интересно, что радиальная координата минимума добротности $r_i/R_2 = 0,98$ соответствует максимуму амплитудной характеристики возбуждения, т.е. наибольшей эффективности возбуждения мод ШГ в исследуемом полудисковом экранированном КДР (рис.2.8).

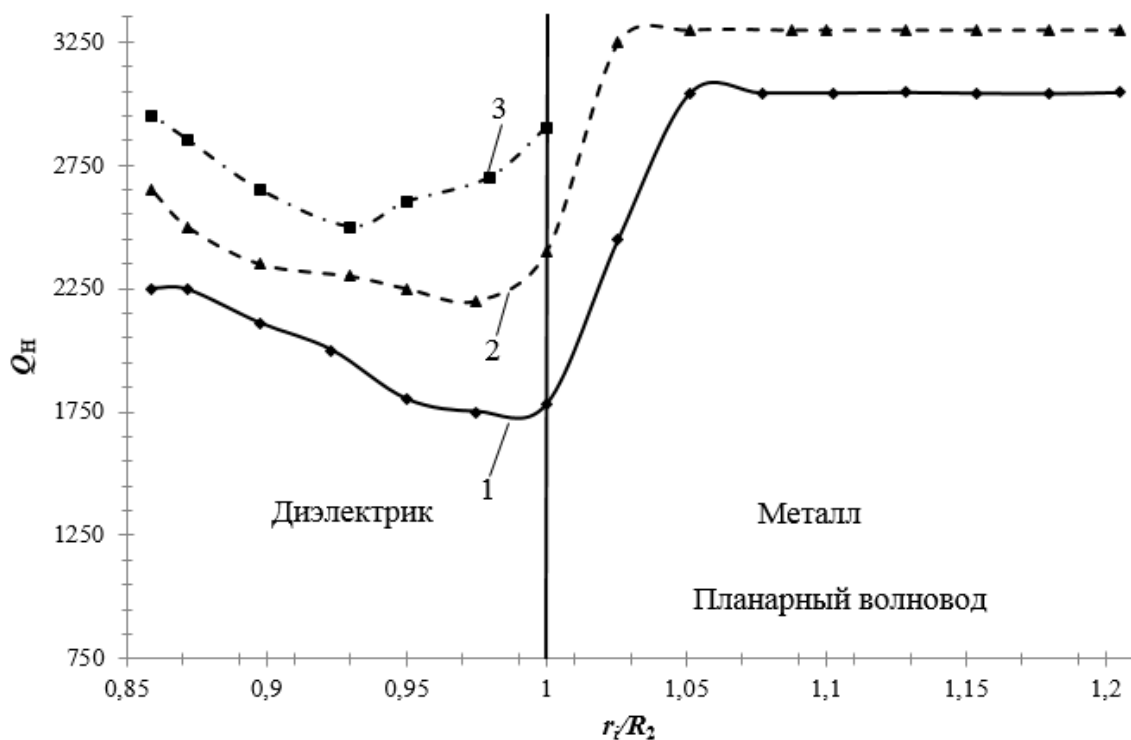


Рис. 2.9. Зависимость нагруженной добротности полудискового экранированного КДР (1), полушарового экранированного КДР (2) и открытого полудискового КДР (3) КДР и от относительной радиальной координаты щели связи возбуждения.

По аналогии с результатами исследований открытых КДР можно предположить, что существенную роль в ухудшении добротности играют

потери энергии на краях локального элемента связи – щели. Наибольший вклад в общие потери энергии в резонаторе они вносят при расположении локального элемента связи в области максимума интенсивности резонансного поля. Наибольшие значения амплитуды резонанса при $r_i/R_2 = 0,98$ (рис.2.8) свидетельствуют о нахождении максимума интенсивности резонансного поля моды ШГ в этой области. Таким образом, минимум величины добротности полудискового экранированного КДР, регистрируемый при расположении щели связи в на участках поля с высокой интенсивностью, объясняется рассеянием поля на краях локального элемента связи, расположенного вблизи плоской границы. Кроме того, в этом случае добавляются еще и омические потери энергии в металлическом экране резонатора. При смещении щели связи вглубь диэлектрической резонансной структуры наблюдается рост нагруженной добротности до уровня с близким к постоянному значением величины $Q_n \approx 2250$ при $r_i/R_2 < 0,87$. Такое поведение нагруженной добротности объясняется снижением потерь энергии на краях щели связи при ее расположения на спадающих участках резонансного поля.

Существенно повысить величину нагруженной добротности полудискового экранированного КДР позволяет использование планарного волновода для возбуждения мод ШГ в нем. Так, при расположении щели связи в планарном волноводе ($r_i/R_2 = 1,05$) нагруженная добротность исследуемого резонатора повышается на 40% по сравнению с ее минимальным значением ($r_i/R_2 = 0,98$) и на 25% по сравнению с расположением щели связи в резонаторе в области спадающего поля ($r_i/R_2 = 0,87$). Интересно, что при значениях величины $1,05 < r_i/R_2 < 1,25$ значения нагруженной добротности близки к постоянным $Q_n \approx 3050$. Такое поведение нагруженной добротности полудискового экранированного КДР объясняется тем, что при возбуждении мод ШГ в нем планарным волноводом, потери энергии резонансного поля на краях локального элемента связи минимальны по сравнению с расположением локального элемента связи в резонаторе. Близкие к постоянным значения нагруженной добротности при расположении щели связи в планарном

волноводе указывают на то, что потери на связь в этом случае также близки к постоянным. Это означает, что при слабой связи элемента подвода энергии с резонатором его нагруженная добротность наиболее близка к собственной.

Несколько повысить нагруженную добротность экранированного КДР позволяет использование полушаровой диэлектрической структуры (кривая 2 на рис. 2.9). При этом поведение зависимости $Q_n(r_i/R_2)$ имеет тот же характер, что и для полудискового экранированного КДР. Наибольшие значения величина Q_n приобретает при возбуждении мод ШГ в экранированном резонаторе планарным волноводом. По аналогии с подобными открытыми КДР можно предположить, что существенный вклад в собственные потери энергии полудискового КДР вносят потери со стороны плоских боковых срезов. Для открытого КДР – это радиационные потери, для экранированного резонатора – омические. Полушаровые КДР не имеют таких резких границ криволинейной поверхности. По этой причине они обладают более высокой добротностью. Такое соотношение добротности сохраняется и для экранированных диэлектрических структур.

Рассматривая зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса на выходе экранированного КДР с полушаровой резонансной структурой от радиальной координаты r_i/R_2 щели связи (кривая 2 на рис. 2.8), следует отметить, что она имеет немонотонный характер, близкий к поведению подобной зависимости для полудискового экранированного КДР. Максимумы эффективности возбуждения, которые соответствуют наибольшему значению величины A_0/A_{max} , для полудискового и полушарового экранированных КДР имеют одинаковую радиальную координату, что определяется сходством распределения их резонансных полей. При этом во всем интервале значений величины r_i/R_2 значения коэффициента передачи для полудискового и полушарового экранированных КДР близки. В максимуме зависимости $A_0/A_{max}(r_i/R_2)$ при использовании щели связи в резонаторе достигаются большие значения коэффициента передачи в полудисковом резонаторе. Также использование планарного волновода позволяет более эффективно

возбуждать моды ШГ в полудисковом экранированном КДР по сравнению с подобным резонатором на основе диэлектрического полушара. Можно предположить, что на участке связи (в области расположения элемента связи) резонансное поле экранированного КДР на основе полудиска имеет более высокую относительную интенсивность, чем поле полушарового экранированного КДР. Такое отличие связано с различием их геометрии. Для диэлектрического полудиска участок связи на его криволинейной поверхности имеет прямолинейную форму и совпадает с геометрией щели связи, а для диэлектрического полушара он искривлен.

Вызывает интерес сравнение энергетических характеристик экранированных диэлектрических резонансных структур с подобными электродинамическими характеристиками открытых диэлектрических резонаторов. Для сравнения в работе были выбраны значения относительной амплитуды резонанса на выходе резонатора и нагруженной добротности полудискового открытого КДР с теми же параметрами, что и для экранированного резонатора. Условия проведения экспериментальных исследований экранированного и открытого КДР были одинаковыми. Использовалась схема включения резонатора во внешнюю цепь «на проход». Необходимо отметить, что ранее проведенные исследования электродинамических характеристик открытого полудискового КДР в работах других авторов, относились к схеме «на отражение». В силу конструктивных особенностей открытого КДР возбуждение мод ШГ в нем планарным волноводом не проводилось. Использовалось возбуждение мод ШГ щелью связи со стороны диэлектрического элемента резонатора.

На рис. 2.8 и 2.9, соответственно, кривыми 3 отображены зависимости относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса и нагруженной добротности Q_n от относительной радиальной координаты r_i/R щели связи возбуждения полудискового открытого КДР. Щель связи вывода энергии из резонатора располагалась на краю резонатора $r_0/R = 1$. Исследования были проведены на

близких резонансных частотах с частотами экранированного КДР. Как было показано в подразделе 2.1 различие между ними составляет около 280 МГц.

При сравнении соответствующих энергетических характеристик полудискового экранированного и открытого КДР в режиме возбуждения мод ШГ следует отметить, что при расположении щели связи возбуждения вблизи границы диэлектрического полудиска более высокие значения коэффициента передачи достигаются при использовании экранированного резонатора. При этом зависимость A_0/A_{max} (r_i/R) для открытого КДР имеет немонотонный характер, также как и для экранированного резонатора. Однако радиальные координаты максимумов относительной амплитуды резонанса для открытого и экранированного КДР отличаются. В абсолютных единицах измерения максимум величины A_0/A_{max} как функции от r_i/R для открытого КДР достигается при смещении щели связи возбуждения вглубь диэлектрика на 2 мм по отношению к максимуму данной зависимости для экранированного резонатора, что, по-видимому, связано с различием распределения резонансного поля в них. Из рис. 2.9 видно, что во всем интервале значений радиальной координаты щели связи возбуждения, открытый КДР обладает более высокой нагруженной добротностью (на 40% в среднем), чем подобный экранированный резонатор. Также как и для экранированного КДР зависимость Q_n от r_i/R для открытого резонатора имеет выраженный минимум, радиальная координата которого почти совпадает с радиальной координатой максимума относительной амплитуды. По отношению к экранированному КДР они разнятся. Различия в значениях относительной амплитуды резонанса, которые информативны для оценки эффективности возбуждения, для открытого и экранированного КДР не столь велики как в значениях нагруженной добротности. Из этого можно предположить, что открытый полудисковый КДР обладает более высокой и собственной добротностью по сравнению с подобным экранированным резонатором. Для объяснения отличий энергетических характеристик экранированных и открытых КДР

необходимы дополнительные исследования распределения интенсивности резонансного поля вдоль радиальной координаты.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2

Проведенные исследования спектральных и энергетических характеристик экранированных КДР с модами ШГ показали, что они во многом определяются способами возбуждения. Использование локального источника в виде щели связи в металлическом зеркале резонатора приводит к сдвигу собственных частот резонатора и снижению добротности. Показано, что спектр колебаний, возбуждаемых в экранированных КДР щелью связи густой. Помимо мод ШГ в нем присутствуют лучевые колебания, а также моды ШГ с иной поляризацией.

Принципиально улучшить электродинамические характеристики экранированных КДР в режиме возбуждения мод ШГ позволило использование планарного волновода, образованного проводящими плоскостями металлического зеркала резонатора и его экрана, расстояние между которыми существенно меньше длины волны. Подвод энергии поля от внешнего источника к нему осуществлялся посредством щели связи, расположенной в одной из его плоскостей. Планарный волновод позволяет подвести энергию электромагнитного поля от внешнего источника к резонатору непосредственно в область локализации резонансного поля мод ШГ. При этом конструктивно геометрия резонатора не нарушается, в отличие от использования локальных элементов связи, таких как, щель, штырь, петля связи. Благодаря этому планарный волновод не возмущает поле мод ШГ в экранированных КДР. Использование планарного волновода для возбуждения мод ШГ в таких резонаторах позволило достичь более высокие значения их нагруженной добротности по сравнению с использованием известных методов возбуждения колебаний. Величина нагруженной добротности экранированных КДР при использовании планарного волновода почти не

зависит от места расположения в нем элемента подвода энергии – щели связи. Это позволяет сделать вывод о том, что связь планарного волновода с резонатором слабая. При этом потери на связь близки к постоянным, и они малы. По этой причине величина нагруженной добротности, достигаемая при связи резонатора с планарным волноводом, близка к величине собственной добротности.

Помимо этого модовый спектр экранированных КДР разрежен. В нем присутствуют только моды ШГ с приоритетной *EH*-поляризацией для резонаторов с диэлектрическим элементом цилиндрической формы и *TM*-поляризации для экранированных КДР на основе диэлектрического полушара.

При сравнении энергетических характеристик экранированных КДР с характеристиками подобных открытых резонаторов установлено, что они обладают меньшей добротностью. Главной причиной этому является высокая концентрация поля вблизи металлического экрана. Большие омические потери в стенках металлического экрана не позволяют достигать высокой добротности экранированных КДР.

Результаты исследования полудисковых и полушаровых экранированных КДР показали, что они обладают несущественно отличающимися добротностями по причине близкого распределения интенсивности резонансного поля.

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СВЯЗЬ ЭКРАНИРОВАННЫХ КДР С ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ

В разделе 2 была показана перспективность использования планарного волновода для возбуждения мод ШГ в экранированных КДР разных форм. При этом большой интерес вызвали исследования волновых процессов, возникающих в результате электромагнитной связи планарного волновода с такими резонаторами. Их изучению посвящен раздел 3 данной диссертационной работы.

3.1 Распределения резонансных полей мод ШГ в экранированных КДР и их зависимость от условий возбуждения.

Информативной характеристикой КДР с позиции оценки собственных потерь энергии и потерь на локальном элементе связи является распределение интенсивности резонансного поля мод ШГ в экранированных КДР вдоль радиальной координаты. При использовании схемы включения исследуемого экранированного КДР во внешнюю цепь «на проход» количественно оценить распределение интенсивности поля позволяет зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса на выходе резонатора от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии. Наибольшие значения амплитуды резонанса на выходе резонатора будут соответствовать максимуму интенсивности резонанса. Для проведения соответствующих исследований локальное зеркало с расположенной в ней щелью связи вывода энергии (рис. 2.1) было подвижным вдоль радиальной координаты. При проведении исследований положение щели связи возбуждения фиксировалось на границе диэлектрического элемента резонатора.

На рис. 3.1 показан график зависимости относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии. Кривые 1 и 2 отображают поведение интенсивности резонансного поля возбуждаемых в полудисковом и полушаровом

экранированных КДР колебаний, соответственно. Параметры данных резонаторов были указаны в разделе 2. Для сравнения кривой 3 показан характер распределения поля моды ШГ в полудисковом открытом КДР с теми же параметрами диэлектрической резонансной структуры, что и в экранированном резонаторе.

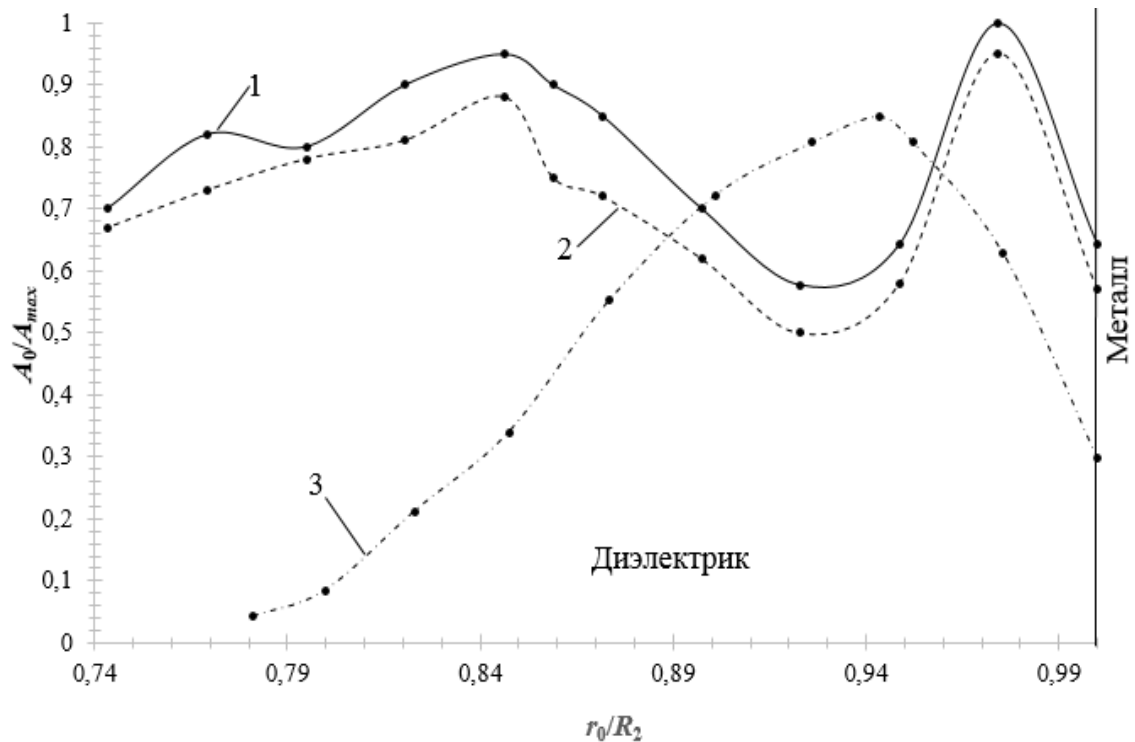


Рис. 3.1. Зависимость относительной амплитуды резонанса от относительной радиальной координаты щели связи вывода энергии внутри экранированного КДР на основе полудиска - 1, полушара – 2 и открытого полудискового КДР – 3.

Представленные зависимости соответствуют частотам резонансов, близким к 36,5 ГГц. Положение щели связи возбуждения фиксировалось, как было отмечено ранее, в точке с радиальной координатой $r_i/R_2 = 1$.

Следует отметить, что резонансное поле моды ШГ в основном сконцентрировано вблизи границы диэлектрического элемента резонатора с металлическим экраном.

Максимум интенсивности поля находится в непосредственной близости от металлического экрана резонатора в точке с $r_0/R_2 \approx 0,98$ (1 мм от края диэлектрического полудиска). При этом относительная интенсивность резонансного поля на металле резонатора велика, что определяет высокие омические потери энергии. Резонансное поле моды ШГ расположено в узкой области внутри интервала значений величины $r_0/R_2 = 0,92 \div 1$. При смещении щели связи вывода энергии внутрь диэлектрика за область локализации поля моды ШГ наблюдается рост амплитуды резонанса с максимумом в точке $r_0/R_2 \approx 0,85$. При этом резонансная частота плавно изменяется (повышается) на 30 МГц. Это свидетельствует о возбуждении лучевого колебания, которому в представлениях геометрической оптики соответствует шестиугольник. Видно, что природа этого колебания с точки зрения распределения резонансного поля, близка к модам ШГ. Возможность возбуждения лучевого колебания в КДР была показана в работах [134, 135]. Положение максимума интенсивности резонансного поля в точке с $r_0/R_2 \approx 0,85$ хорошо согласуется с геометрооптическими представлениями о возбуждении лучевого «шестиугольного» колебания в исследуемых экранированных КДР.

Распределение интенсивности резонансных полей мод ШГ в экранированных КДР показывают, что их низкая добротность во многом определяется высокими омическими потерями энергии в стенках металлического экрана. При этом, как видно из рис. 3.1, распределение резонансного поля мод ШГ в экранированных КДР мало зависит от типа их криволинейной поверхности.

В открытом КДР поле моды ШГ сосредоточено глубже в области диэлектрика по сравнению с полями мод ШГ в подобных экранированных резонаторах. Максимум интенсивности резонансного поля соответствует точке с относительной радиальной координатой $r_0/R_2 \approx 0,94$. Область локализации резонансного поля значительно шире, чем в экранированных КДР. Интенсивность поля на границе диэлектрика с воздухом, которая определяет радиационные потери энергии, относительно невелика и

существенно меньше, чем в экранированных диэлектрических структурах. Это объясняет более высокую добротность открытых КДР по сравнению с подобными экранированными резонаторами. Отметим, что в отличие от экранированных КДР, лучевые колебания в подобных открытых резонаторах не возбуждаются по причине невыполнения условия полного внутреннего отражения волн от границы раздела диэлектрик-воздух. Свидетельством этому является спадание относительной амплитуды резонанса до минимальных значений при значительном смещении щели связи вывода энергии вглубь диэлектрика ($r_0/R_2 \approx 0,78$). Необходимо сказать, что распределение интенсивности резонансного поля мод ШГ в открытом полудисковом КДР, представленное на рис. 3.1, хорошо согласуется с результатами работ других авторов [144, 145].

Напомним, что при описанном методе исследований распределения полей мод ШГ в экранированных КДР, использовалась известная схема «на проход», когда вывод сигнала осуществлялся непосредственно из резонатора. В этой связи интересным является вопрос о возможности использования планарного волновода как элемента вывода энергии резонансного поля из экранированного КДР. Выше были показаны преимущества использования планарного волновода при возбуждении мод ШГ в экранированных КДР, которые заключаются в разреженности спектральных характеристик и повышении добротности резонаторов. Наиболее информативными в этом направлении являются исследования частот и амплитудных характеристик сигнала на выходе экранированного КДР при использовании планарного волновода.

На рис. 3.2 графически представлена зависимость частоты f_n сигнала на резонансной частоте моды ШГ на выходе полудискового экранированного КДР от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии при фиксированной радиальной координате щели связи возбуждения $r_i/R_2 = 1,1$.

Отметим, что при $r_0/R_2 > 1$ щель связи вывода энергии располагалась за пределами исследуемого экранированного КДР. В этом случае ее положение является зеркальным отображением щели связи возбуждения в планарном волноводе (рис.2.1). Также как и щель связи возбуждения, щель связи вывода энергии могла располагаться как в области резонатора, так и в планарном волноводе на диаметрально противоположенной стороне относительно полудисковой структуры. При проведении исследований высоты планарных волноводов со стороны элемента возбуждения и элемента вывода энергии выбирались одинаковыми $h \approx 100$ мкм.

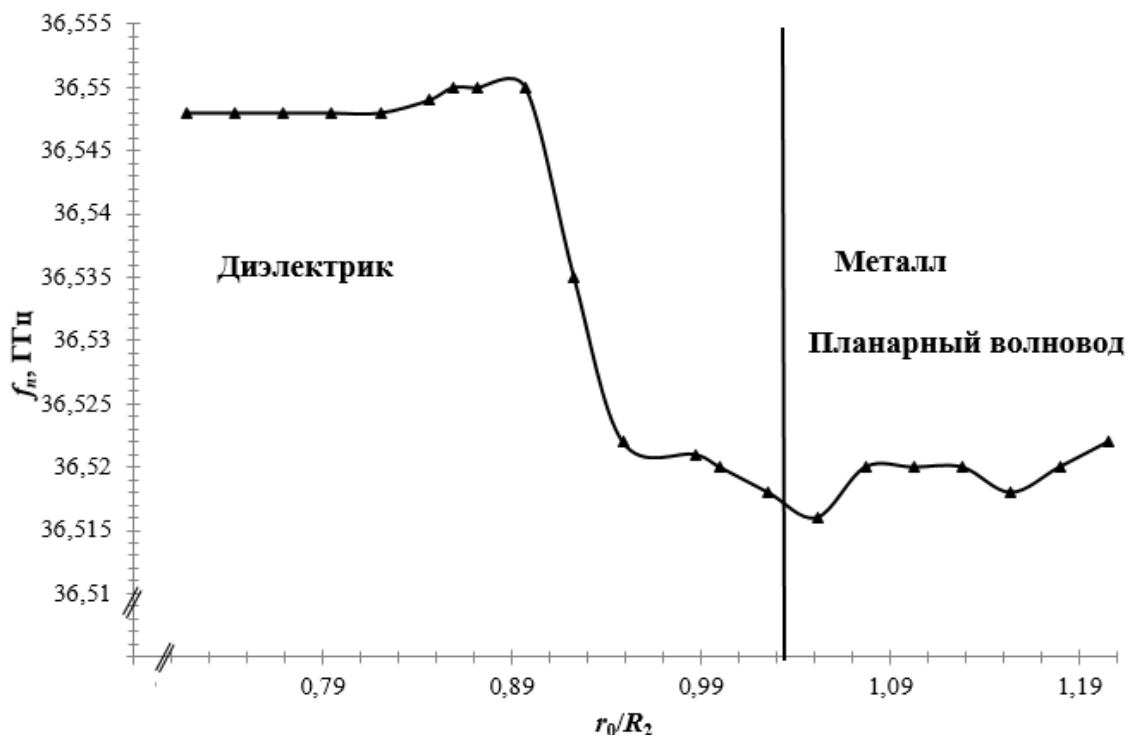


Рис. 3.2. Зависимость частоты полудискового экранированного КДР от относительной радиальной координаты щели связи вывода энергии при фиксированном положении щели связи возбуждения.

На рис. 3.2 наблюдаются две широкие области изменения радиальной координаты r_0/R элемента вывода энергии ($0,95 \div 1,20$ и $0,64 \div 0,91$), для которых частота близка к постоянной. При этом абсолютные значения частоты в этих областях мало зависят от положения щели связи возбуждения как внутри

резонатора, так и за его пределами, в планарном волноводе. Первая область соответствует возбуждению мод ШГ и их резонансным частотам.

Различия в значениях резонансных частот при выводе сигнала из резонатора как через щель связи ($r_0/R < 1$), так и через планарный волновод ($r_0/R > 1$) незначительны. Это указывает на то, что поле мод ШГ, сформированное в экранированном КДР, проникает в планарный волновод. Причем глубина такого проникновения резонансного поля в планарный волновод, как видно из 3.1, достаточно велика, поскольку превышает длину волны. Это позволяет сделать вывод о возможности использования планарного волновода не только для возбуждения мод ШГ в экранированных КДР, но и для вывода сигнала на их резонансных частотах.

Обратим внимание на вторую область рис. 3.2 с близким к постоянному изменению частоты при $0,64 < r_0/R < 0,91$. Значения радиальной координаты щели связи вывода энергии в этом интервале изменения ее значений позволяют утверждать о возбуждении лучевого «шестиугольного» колебания. При использовании планарного волновода частота выходного сигнала отлична от частоты лучевого колебания и, как показано выше, соответствует частоте моды ШГ. Таким образом, в спектре сигнала на выходе экранированного КДР при использовании планарного волновода присутствуют только частоты мод ШГ. По этой причине, как было показано в подразделе 2.1, удастся максимальным образом разредить спектр экранированных КДР и выделить исключительно моды ШГ.

Доказательством электромагнитной связи исследуемого экранированного КДР с планарным волноводом являются данные, показанные на рис. 3.3. На нем представлена зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии. Исследования проведены при двух фиксированных положениях щели связи возбуждения $r_i/R_2 = 0,99$ (кривая 1) и 1,1 (кривая 2). Таким образом, щель связи вывода энергии из резонатора могла располагаться как внутри резонатора, так и за его пределами (в планарном волноводе).

При проведении исследований высоты планарных волноводов со стороны элемента возбуждения и элемента вывода энергии выбирались одинаковыми $h \approx 100$ мкм.

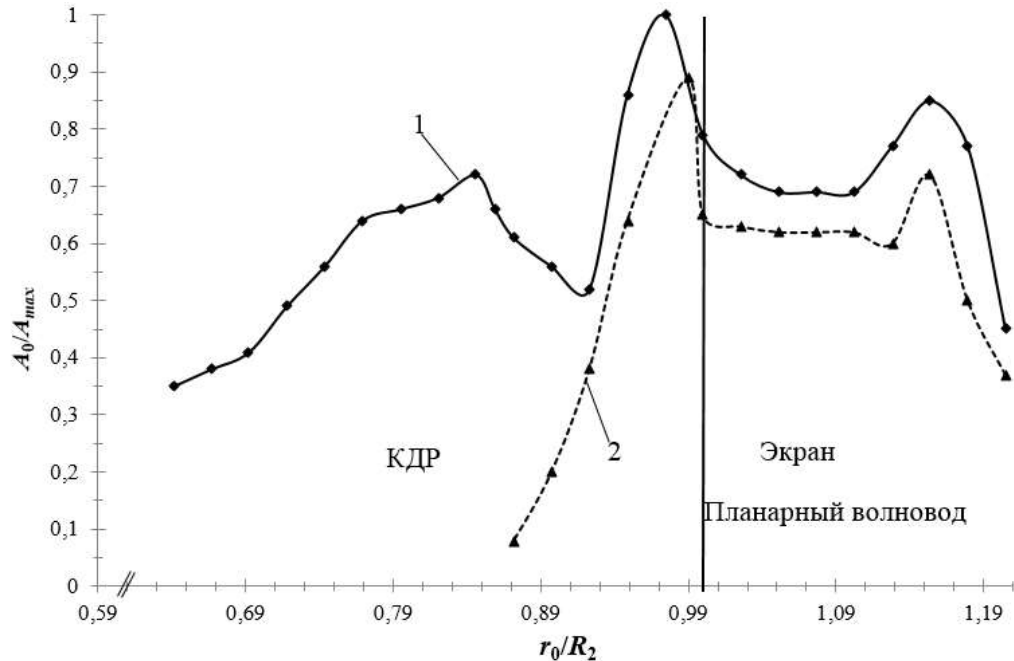


Рис. 3.3. Зависимость относительной амплитуды резонанса в полудисковом экранированном КДР от положения щели связи вывода энергии: в резонаторе и в планарном волноводе при различных радиальных координатах щели связи возбуждения.

Кривые зависимости на рис. 3.3 наглядно демонстрируют переход резонансного поля мод ШГ от экранированного резонатора в планарный волновод на расстояния, превышающие длину волны. Высокие значения амплитуды резонанса при расположении щели связи в планарном волноводе указывают на малое затухание сигнала в планарном волноводе на выходе резонатора. Это позволяет сделать вывод о том, что планарный волновод позволяет обеспечить эффективную связь с экранированным КДР при выводе энергии резонансных полей мод ШГ из него.

Кроме того, использование планарного волновода позволяет разредить спектр колебаний экранированных, как было показано в Разделе 2. Из рис. 3.3 видно, что при использовании щели связи возбуждения, расположенной

внутри резонаторов возбуждаются лучевые колебания, поля которых локализованы глубже в диэлектрике по сравнению с полями мод ШГ. Подтверждением этому является характерный рост амплитуды резонанса в интервале значений величины $r_0/R_2 = 0,63 \div 0,93$. В отличие от этого, как видно, поведение кривой относительной амплитуды резонанса при использовании планарного волновода указывает на возбуждение лишь только мод ШГ.

Таким образом, анализируя результаты исследования возбуждения мод ШГ в экранированных КДР (раздел 2) и вывода энергии резонансного поля путем использования планарных волноводов по схеме «на проход», следует сделать вывод о высокой эффективности электромагнитной связи резонатора с планарным волноводом. Такая схема включения экранированного КДР в цепь связи подвода и вывода энергии резонансного поля, образованную двумя планарными волноводами, позволяет рассматривать ее как фильтр резонансного типа. «Чистота» спектральных характеристик экранированного резонатора, достигаемая при таком способе подвода и вывода энергии, демонстрирует его высокую избирательную способность.

3.2 Распределения полей в планарном волноводе при его связи с экранированным КДР.

Экспериментальные результаты, представленные на рис. 3.3, как отмечалось выше, позволяют оценить распределение интенсивности резонансного поля не только в экранированном КДР, но и в связанном посредством электромагнитной связи с ним планарном волноводе. Видно, что распределение интенсивности резонансного поля экранированного КДР в планарном волноводе на участке вывода энергии имеет немонотонный характер. Наблюдаемый максимум зависимости $A_0/A_{max}(r_0/R_2)$ в точке с $r_0/R_2 \approx 1,15$ указывает на существование пучности поля. При этом вызывает интерес исследование распределения поля в планарном волноводе в широком

интервале изменения радиальной координаты щели связи вывода энергии при $r_0/R_2 > 1$. Кроме того, данная зависимость важна при оценке потерь в планарном волноводе при выводе сигнала из экранированного КДР и его дальнейшей передаче.

На рис. 3.4 показаны кривые зависимости $A_0/A_{max}(r_0/R_2)$ при двух различных положениях щели связи возбуждения, а именно, при $r_i/R_2 = 0,99$ (кривая 1) и 1,1 (кривая 2).

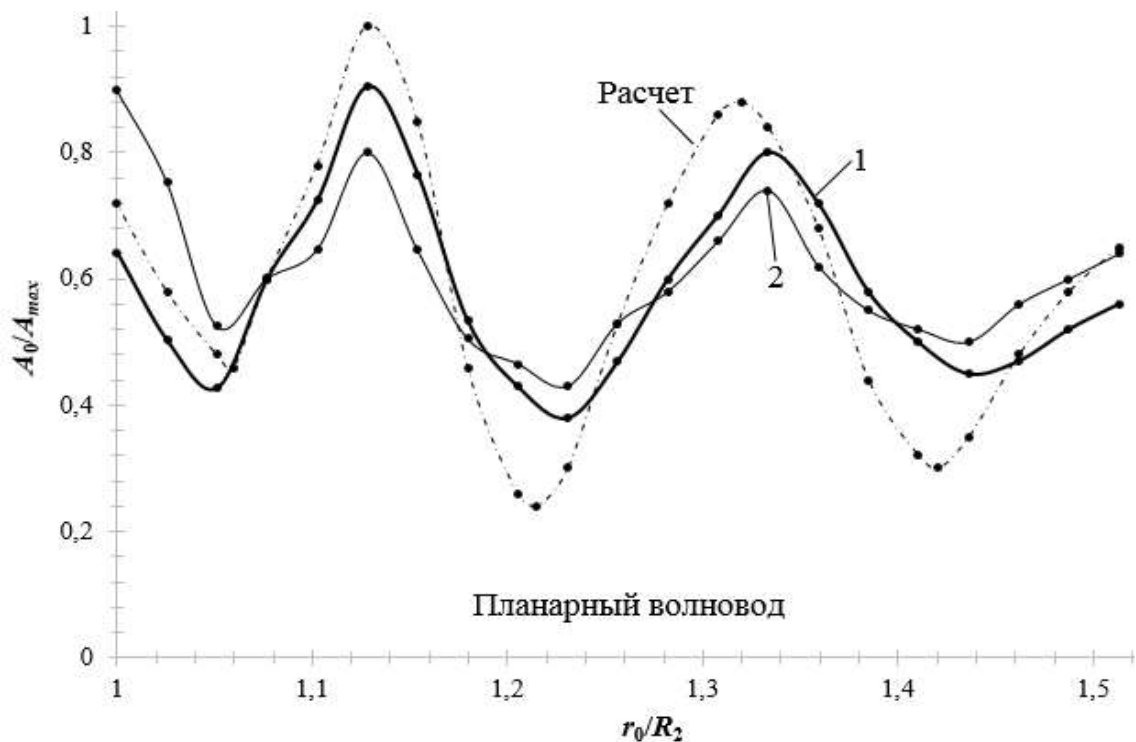


Рис. 3.4. Распределение интенсивности поля в планарном волноводе вывода энергии на частоте полудискового экранированного КДР при различных радиальных координатах щели связи возбуждения.

Из рис. 3.4 видно, что распределение интенсивности резонансного поля полудискового экранированного КДР в планарном волноводе на выходе резонатора соответствует режиму стоячей волны. Свидетельством этому являются характерные периодические осцилляции амплитуды сигнала, которые указывают на существование пучностей и узлов поля в планарном волноводе. Расстояние по радиальной координате между соседними

максимумами и минимумами близко к постоянному во всем интервале изменения величины r_0/R_2 и соответствует половине длины волны. Видно, что значения относительной амплитуды сигнала в точках экстремума зависимости $A_0/A_{max}(r_0/R_2)$ мало зависят от расположения щели связи возбуждения, которая могла располагаться как внутри резонатора, так и за его пределами в планарном волноводе. Это говорит о высокой эффективности возбуждения мод ШГ в экранированных КДР планарным волноводом.

Кроме того, несмотря на затухающий с ростом величины r_0/R_2 характер представленной амплитудной зависимости, необходимо отметить сравнительно незначительное снижение амплитуды резонанса при смещении щели связи вывода энергии вглубь планарного волновода. Различие относительной амплитуды резонанса для соседних точек максимума зависимости $A_0/A_{max}(r_0/R_2)$ составляет около 10 %. Данная величина отображает малые потери в планарном волноводe при выводе сигнала из экранированного КДР.

Для сравнения с результатами эксперимента на рис. 3.4 пунктирной кривой показана расчетная зависимость относительной амплитуды резонанса от положения щели связи вывода энергии в планарном волноводe по радиальной координате, выполненная с помощью программного пакета CST Microwave Studio 2011. Данная программа позволяла оценить интенсивность поля в планарном волноводe в точках с различными радиальными координатами. При сравнении эксперимента с расчетом видно хорошее соответствие между ними. Также как и при экспериментальных исследованиях, расчет поля в планарном волноводe указывает на режим стоячей волны в нем. При этом значения относительной радиальной координаты экстремумов поля хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Незначительное различие в значениях относительной амплитуды резонанса между расчетом и экспериментом объясняется неидеальностью геометрических параметров планарного волновода в последнем случае.

Как отмечалось выше, несмотря на открытый с одного конца характер планарного волновода, наличие узлов и пучностей поля свидетельствует о существовании режима стоячей волны в нем наряду с режимом бегущей волны. По всей видимости, причиной режима стоячей волны является дифракция волн на открытом конце планарного волновода вследствие его малой высоты.

Наряду со свойствами сигнала на выходе резонатора вызывает интерес структура поля в планарном волноводе на участке возбуждения волн щелью связи. На рис. 3.5 показано распределение полей в планарном волноводе со щелью связи возбуждения на частоте 36,5 ГГц, полученное путем компьютерного моделирования.

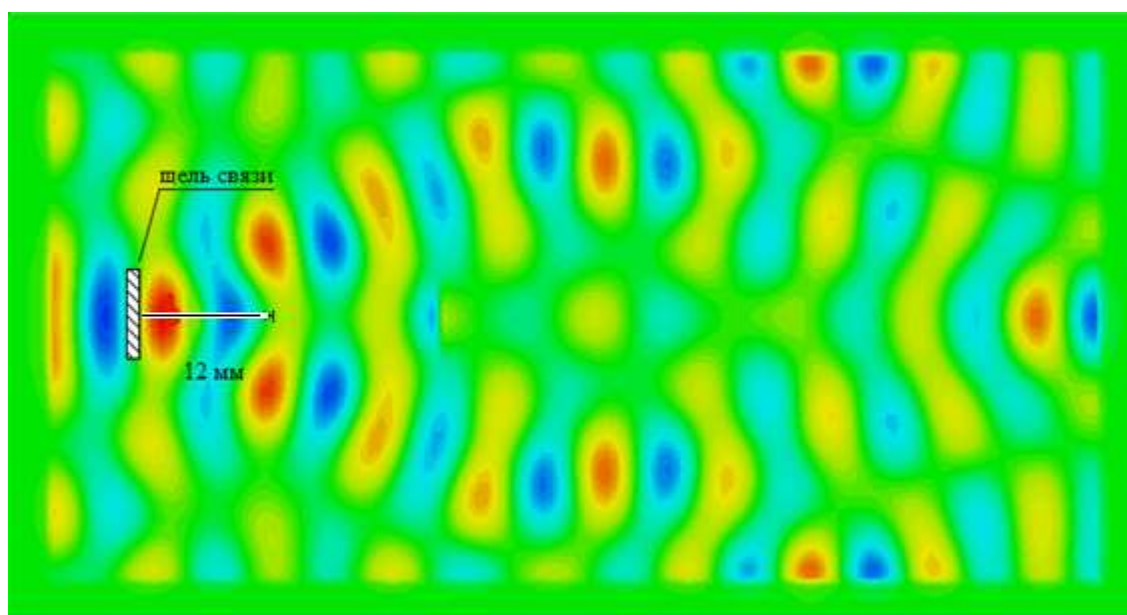


Рис. 3.5. Расчетное распределение поля в планарном волноводе с элементом возбуждения на резонансной частоте полудискового экранированного КДР.

Видно, что как и в планарном волноводе вывода сигнала из резонатора, в структуре поля наблюдаются характерные максимумы и минимумы (темные области на рис. 3.5), расстояние между которыми соответствует половине длины волны. Интересным с позиций волновых процессов в планарном волноводе является участок поля удаленный от элемента возбуждения волн на

расстояние около 12 мм (рис.3.5). Его главной особенностью является преобразование моды основного волноводного типа TE_{10} в моду TE_{20} . Такое преобразование определяется двумя причинами. Во-первых, пучок волн, исходящих из щели связи является расходящимся. Во-вторых, размеры металлических стенок планарного волновода в направлении перпендикулярном распространению волн много больше длины волны, что позволяет сформировать поле моды с высшими поперечными индексами, как TE_{20} . При дальнейшем распространении волны в планарном волноводе возможно дальнейшее модовое преобразование в моды с более высокими поперечными индексами, как TE_{30} и т.д. в случае, когда поперечные размеры стенок планарного волновода достаточно велики. Таким образом, следует говорить о многомодовости используемого в работе планарного волновода. Это его свойство может существенно влиять на величину связи с экранированными КДР в случае, когда щель связи возбуждения расположена в планарном волноводе на расстояниях, составляющих несколько длин волн от края резонатора. По этой причине для обеспечения эффективной связи планарного волновода с экранированными КДР в работе щели связи возбуждения и вывода энергии располагались за пределами резонатора на расстояниях, не превышающих 12 мм от его края.

Для лучшего понимания волноведущих свойств планарного волновода, связанного с экранированным резонатором, необходимы исследования влияния его высоты на амплитудные характеристики выходного сигнала на разных резонансных частотах экранированного КДР.

На рис. 3.6 графически представлена зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса от высоты h планарного волновода вывода энергии для разных резонансных частот (37,3 ГГц – кривая 1; 33,8 ГГц – кривая 2 и 29,2 ГГц – кривая 3).

Высота планарного волновода со щелью связи возбуждения соответствовала высоте планарного волновода на участке вывода энергии.

Положения щели связи возбуждения и щели связи вывода энергии фиксировались в соответствующих планарных волноводах $r_i/R_2 = r_0/R_2 = 1,1$.

Данная зависимость позволяет оценить волноведущие свойства (коэффициент передачи) планарного волновода на собственных частотах полудискового экранированного КДР. Кроме того, она информативна для оценки дисперсионных свойств планарного волновода.

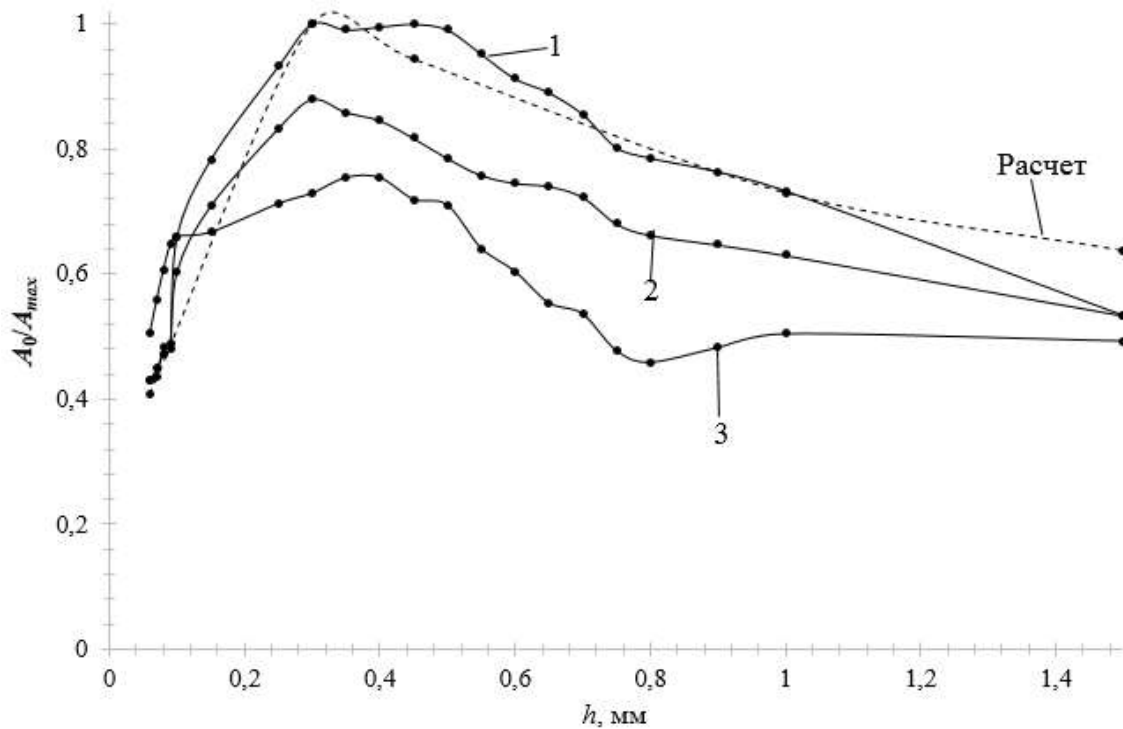


Рис. 3.6. Зависимость относительной амплитуды резонанса от высоты планарного волновода вывода энергии на разных резонансных частотах полудискового экранированного КДР.

Главной особенностью представленной зависимости на разных частотах является ее немонотонный характер. Наблюдаемый максимум зависимости $A_0/A_{max}(h)$ при $h \approx 300 \div 500$ мкм определяет оптимум пропускной способности планарного волновода с позиций наименьших потерь энергии. Можно предположить, что при малых высотах планарного волновода $50 \text{ мкм} < h < 300 \text{ мкм}$ основной вклад в общие потери в планарном волноводе вносят омические потери в его металлических стенках. При большой высоте планарного волновода $h > 500$ мкм существенную роль играют радиационные

потери. Видно, что при оптимальных высотах планарного волновода ($h \approx 300 \div 500$ мкм) коэффициент передачи сигнала с ростом частоты увеличивается. Свидетельством этому является рост амплитуды выходного сигнала. Правильность сделанных выводов подтверждают и расчетные результаты (CST Microwave Studio 2011), представленные на рис. 3.6 (пунктирная кривая). Видно хорошее соответствие эксперимента с расчетом.

Представленные на рис. 3.6 кривые зависимости $A_0/A_{max}(h)$ дают основание полагать, что потери в планарном волноводе на участке возбуждения колебаний в резонаторе также малы. Также как и для планарного волновода на участке вывода энергии для него существует оптимум высоты, который характеризуется наименьшими потерями энергии.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 3

Исследованы волноведущие свойства планарного волновода связанного посредством электромагнитной связи с экранированными КДР разной формы как на участке возбуждения, так и на участке вывода энергии из резонатора. Для этого в эксперименте была использована схема «на проход». Экспериментально и путем компьютерного моделирования показано, что на участке вывода энергии, резонансное поле мод ШГ экранированного КДР глубоко проникает в планарный волновод на расстояния, превышающие длину волны. При этом в планарном волноводе возможен режим стоячей волны за счет существования обратной волны, отраженной от его краев. Относительно невысокие значения коэффициента затухания внутри него на частоте резонатора позволяют эффективно использовать планарный волновод как для возбуждения мод ШГ в экранированном КДР, так и для вывода энергии поля из резонатора. Используемая в работе схема подвода энергии внешнего источника и вывода энергии резонансного поля с помощью планарного волновода «на проход» позволяет рассматривать ее как фильтр резонансного

типа. Благодаря высокой разреженности спектральных характеристик подобный фильтр обладает хорошими селективными свойствами.

Показано, что коэффициент передачи планарного волновода на частоте экранированного КДР зависит от его высоты. Установлено существование оптимума передающих свойств планарного волновода, который проявляется в наибольших значениях амплитуды выходного сигнала на частоте резонатора. Высота планарного волновода, соответствующая такому оптимуму, находится в интервалах значений $300 \div 500$ мкм для 8-мм диапазона длин волн. С ростом частоты в 8-мм диапазоне длин волн значение коэффициента передачи планарного волновода увеличивается.

Путем компьютерного моделирования показано, что планарный волновод в силу своих протяженных поперечных размеров является многомодовой волноведущей структурой. В задачах возбуждения мод ШГ в экранированных КДР учет многомодовости планарного волновода необходим при расчете положения элемента возбуждения в нем.

РАЗДЕЛ 4. ВОЗБУЖДЕНИЕ МОД ШГ В ВЫСОКОДОБРОТНОМ ДВУХСЛОЙНОМ ПОЛУШАРОВОМ ЭКРАНИРОВАННОМ КДР ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ

Разделы 2 и 3 были посвящены решению двух задач, поставленных в данной работе, а именно, поиску и использованию новых эффективных маловозмущающих способов возбуждения мод ШГ в экранированных КДР, а также улучшению спектральных характеристик последних. Было показано, что использование планарного волновода, образованного проводящими плоскостями зеркал экранированных КДР и экрана резонатора, позволяет эффективно возбуждать моды ШГ в таких резонаторах. Подвод энергии электромагнитного поля от внешнего источника к планарному волноводу осуществляется посредством локального элемента связи — щели в металлическом зеркале резонатора. При этом сам локальный элемент связи располагается за пределами резонатора. По этой причине он не оказывает сильного возмущения на поля мод ШГ в отличие от локальных элементов связи, расположенных внутри резонатора. Подвод энергии к экранированному КДР осуществляется непосредственно в область локализации полей мод ШГ. При этом связь с полями других колебаний, поля которых локализованы в диэлектрике глубже не осуществляется. По этой причине удастся максимальным образом разредить их модовый спектр и выделить в нем исключительно моды ШГ.

Однако серьезным недостатком экранированных КДР остаются сравнительно невысокие значения добротности. Было показано, что максимум интенсивности резонансного поля мод ШГ в экранированном КДР находится в непосредственной близости от металлического экрана. Это определяет высокие омические потери в стенках экрана, и как следствие этого, малую добротность.

В статьях [131-133] было показано, что принципиально повысить добротность позволяют двухслойные экранированные КДР с воздушным

зазором между диэлектрическим элементом резонатора и его экраном. В работе [132] было получено характеристическое уравнение, определяющее частоты и добротности полушаровых двухслойных экранированных КДР:

$$\left(\alpha_s j'_{11} h_{21}^{(1)} - j_{11} (h_{21}^{(1)})' \right) \left[\beta_s (h_{32}^{(1)})' (j_{22} \eta_{21} - j_{21} \eta_{22}) + \right. \\ \left. + h_{32}^{(1)} (j_{21} \eta'_{22} - j'_{22} \eta_{21}) \right] = -j_{11} \left(\beta_s h_{22}^{(1)} (h_{32}^{(1)})' - h_{32}^{(1)} (h_{22}^{(1)})' \right), \quad (4.1)$$

где $j_n(x)$, $\eta_n(x)$, $h_n(x)$ - сферические функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода, соответственно, которые определяют распределение поля внутри резонатора в средах: 1 – диэлектрик, 2 – воздушный зазор, 3 – металл. Их индексы определяются значением полярного индекса n мод полушарового экранированного КДР. Коэффициенты α_s и β_s определяются соотношением относительных диэлектрических проницаемостей данных сред. Под s подразумевается индекс E для TM либо H для TE мод. Таким образом, значения данных коэффициентов можно определить из следующих выражений:

$$\alpha_H = \alpha_E^{-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}; \quad \beta_H = \beta_E^{-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}}.$$

Отсутствие азимутального индекса m в выражении (4.1) приводит к $(n+1)$ - кратному вырождению резонансных колебаний. В резонаторе на одной и той же частоте могут возбуждаться $(n+1)$ колебаний с различной зависимостью характеристик от азимутальной координаты.

Анализ характеристического уравнения (4.1) показывает, что в сферическом экранированном КДР существуют как моды диэлектрического полушара, так и «объемные колебания» в воздушном зазоре между диэлектрическим элементом резонатора и его металлическим экраном. Правая часть в характеристическом уравнении (4.1) определяет степень взаимодействия этих колебаний. При малых значениях полярного индекса ($n \leq 3$) колебания в диэлектрическом полушаре имеют объемный характер. С увеличением n поле колебаний начинает прижиматься к сферической границы раздела двух сред диэлектрик-воздух. При больших значениях полярного

индекса эти колебания имеют характер мод ШГ, обладающих малыми радиационными потерями.

В работе [133] было показано, что при определенных соотношениях радиуса экрана и диэлектрического полушара в экранированном КДР возможно существование «сверхвысокодобротных» мод ШГ. Величина собственной добротности такого резонатора выше, чем у подобного открытого КДР, и превышает «барьер» добротности, обусловленный потерями в диэлектрическом элементе резонатора. Теоретически было установлено, что причиной этому является частичное смещение резонансного поля из диэлектрического полушара в воздушный зазор резонатора. При этом интенсивность поля в области металлического экрана мала.

Экспериментальные исследования, проведенные в этом направлении, были сопряжены с рядом трудностей. Главной из них было возбуждение таких «высокодобротных» мод ШГ. Используемая щель связи, расположенная внутри объема резонатора, являлась причиной дополнительных потерь энергии на краях локального элемента связи. Рассеяние резонансного поля на ее краях не позволяло достичь высоких значений добротности. Кроме того, высокая густота спектра двухслойного полушарового экранированного КДР существенно затрудняла экспериментальное исследование его электродинамических характеристик.

Поэтому, перспективным для проведения подобных исследований в силу указанных выше преимуществ является использование планарного волновода.

4.1. Спектральные и энергетические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР.

Для достижения высоких добротностей двухслойных полушаровых экранированных КДР нами предлагается использование планарного волновода как элемента возбуждения мод ШГ в них.

Объект экспериментальных исследований схематически показан на рис. 4.1. Двухслойный полушаровый экранированный КДР включает в себя диэлектрический полушар 1, изготовленный из фторопласта-4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=2,08$, радиусом $R_1=39$ мм. Диэлектрический полушар экранировался путем расположения внутри полости 2 сферической формы в бруске алюминия. Радиус экрана составлял $R_2=42$ мм. Таким образом, образовывался тонкий воздушный зазор толщиной 3 мм между диэлектрическим полушаром и металлическим экраном. В работе [133] было показано, что именно при таком соотношении размеров диэлектрического элемента полушарового экранированного КДР и его экрана возможно существование в таком резонаторе «сверхвысокодобротных» мод ШГ. Диэлектрический полушар и металлический экран плоскими основаниями располагались на двух локальных плоских металлических (латунь) зеркалах 3 и 4 квадратной формы со стороной 50 мм. Зеркала были подвижны в радиальном направлении и покрывали область локализации полей мод ШГ со стороны плоского основания полушара (по аналогии с разделом 2). В эксперименте использовалось два способа включения экранированного КДР в цепь волноводно-измерительной линии: методом «на отражение» рис. 4.1 а и методом «на проход» рис. 4.1 б.

Элементами связи, используемыми как в схеме «на отражение», так и в схеме «на проход», служили щели 5 и 6 в локальных зеркалах 3 и 4, соответственно. В эксперименте использовались щели связи с размерами $7,2 \times 0,5$ мм². Путем смещения локальных зеркал по радиальной координате щели связи могли располагаться как внутри резонансной полусферической полости, так и за ее пределами - в планарном волноводе. Таким образом, осуществлялось два различных способа возбуждения колебаний в двухслойном полушаровом экранированном КДР: щелью связи и планарным волноводом. Подвод энергии к щели связи осуществлялся от генераторного блока панорамного измерителя КСВН Р2-65 посредством стандартного волноводного тракта.

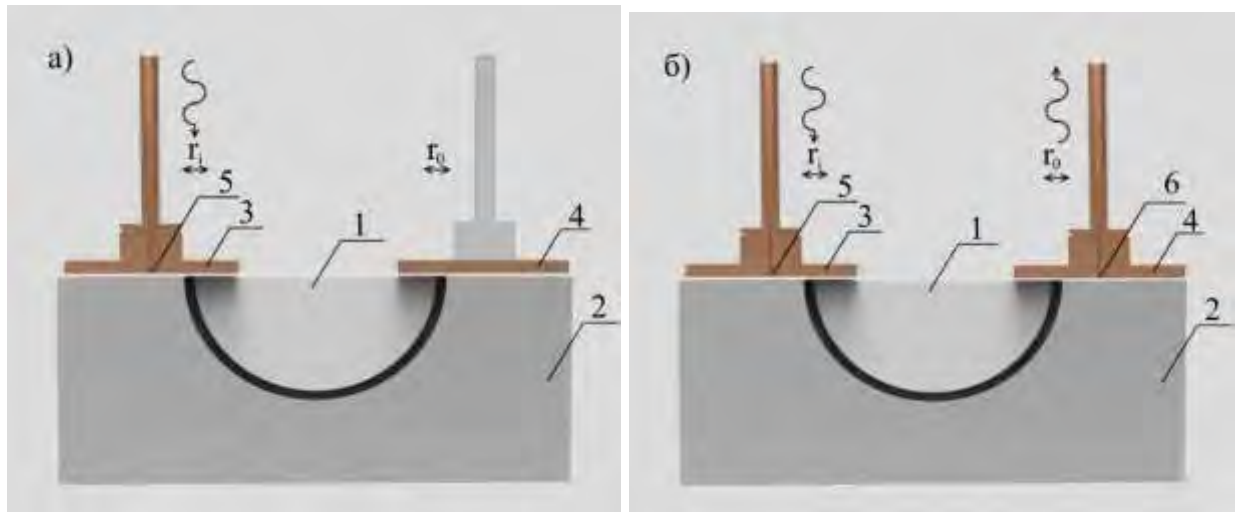


Рис. 4.1. Схемы включения двухслойного полушарового экранированного КДР в цепь связи: «на отражение» (а) и «на проход» (б).

Экспериментальные исследования были проведены в полосе частот $29 \div 37$ ГГц. Исследовались спектральные и энергетические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР в режиме возбуждения мод TM -поляризации. Предметом исследований служили резонансные частоты, КСВН на резонансных частотах (параметр связи) при использовании схемы «на отражение», значения коэффициента ослабления сигнала (коэффициент прохождения) при использовании схемы «на проход». Данные величины позволяли определять при используемых схемах включения резонатора во внешнюю цепь значения собственной добротности Q_0 (схема «на отражение») и нагруженной добротности Q_n (схема «на проход»). В разделе 1 было показано, что при малой высоте планарного волновода ($h < 100$ мкм) использование схемы «на отражение» затруднительно в связи с высоким обратным излучением в волноводный тракт. Поэтому в эксперименте при проведении исследований методом «на отражение» высота планарного волновода составляла 500 мкм, что позволяло выделить резонансный отклик на фоне помех на нерезонансных частотах. Кроме того, было показано, что при таком значении параметра h планарный волновод обладает высокой пропускной способностью в 8-мм диапазоне длин волн.

Для идентификации возбуждаемых в резонаторе различных типов колебаний и качественной оценки потерь энергии на резонансных частотах экранированных КДР исследовались распределения интенсивности резонансных полей вдоль радиальной координаты. Для этого в схеме «на отражение» (рис. 4.1а) использовался метод малой возмущающей неоднородности – пассивной щели в подвижном локальном зеркале 4, в схеме «на проход» - подвижным зондом в виде щели связи 6 вывода энергии (рис. 4.1б).

На рис. 4.2 представлены спектры двухслойного полушарового экранированного КДР при возбуждении в нем *TM*-колебаний щелью связи (а), расположенной внутри резонатора в области полей мод ШГ в диэлектрическом полушаре ($r_i/R_2 \approx 0,9$) и планарным волноводом (б), когда щель связи возбуждения находилась за пределами резонатора ($r_i/R_2 \approx 1,1$).

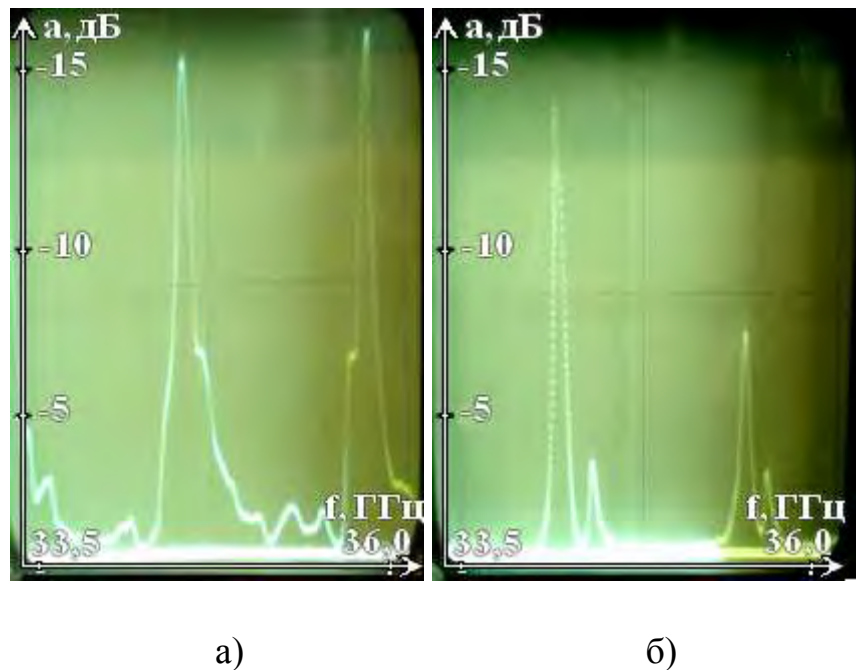


Рис. 4.2. Спектры двухслойного полушарового экранированного КДР в режиме возбуждения мод ШГ щелью связи, расположенной в резонаторе $r_i/R_2 \approx 0,9$ (а), и планарным волноводом $r_i/R_2 \approx 1,1$ (б) по схеме «на проход».

Данные спектрограммы соответствуют схеме измерений «на проход». Щель связи вывода энергии из резонатора располагалась внутри резонатора

($r_0/R_2 \approx 0,9$) при возбуждении колебаний щелью связи и за его пределами ($r_0/R_2 \approx 1,1$) при использовании планарного волновода. Исследования спектров проведены в полосе частот $f \approx 33,5 \div 37,3$ ГГц.

Видно, что при возбуждении колебаний в двухслойном полушаровом экранированном КДР щелью связи, расположенной непосредственно в его резонансном объеме, спектр достаточно густой. По аналогии с полудисковым экранированным КДР можно предположить, что в спектре исследуемого двухслойного экранированного резонатора, помимо ТМ-мод ШГ присутствуют колебания иной природы, такие как лучевые колебания и объемные колебания воздушного зазора, а также моды ШГ TE -поляризации. При возбуждении колебаний в двухслойном полушаровом экранированном КДР планарным волноводом спектр существенно разрежен (рис. 4.2б). На близких частотах с разностью порядка 150 МГц возбуждаются два различных типа колебаний. По шкале частот их резонансные отклики повторяются с близкой периодичностью (период сетки их резонансных частот составляет около 0,9 ГГц). Рассматривая амплитуды и формы резонансных откликов, можно заключить, что эффективность возбуждения этих колебаний и добротность различны. Параметр связи и добротность резонатора выше при возбуждении колебаний на более низких частотах. Проведенные с целью идентификации данных двух колебаний исследования распределения их полей в резонаторе вдоль радиальной координаты показали, что одно из них соответствует моде ШГ (максимум поля в диэлектрическом полушаре), а другое – «объемному колебанию» с локализацией поля в воздушном зазоре резонатора. Возможность существования последних в двухслойных экранированных КДР было показано расчетным путем в работе [133]. Моде ШГ на спектрограмме рис. 4.2 б соответствует резонанс с большей амплитудой. Именно это колебание является более «высокодобротным». Добротность резонатора на моде колебания воздушного зазора существенно меньше. Как было показано [133], основной причиной низкой добротности резонатора при возбуждении в нем таких колебаний являются высокие

омические потери в стенках металлического экрана. Результаты более подробного исследования распределения интенсивности резонансных полей мод ШГ и объемных колебаний воздушного зазора двухслойного полушарового экранированного КДР будут представлены ниже.

Исследования частот мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР показали, что, как и в случае полудисковых экранированных КДР, они зависят от способов их возбуждения. Данные, представленные на рис. 4.3, свидетельствуют об этом. На рис. 4.3 графически показана зависимость резонансной частоты f_n от относительной радиальной координаты r_i/R_2 щели связи возбуждения при включении экранированного резонатора во внешнюю цепь по схеме «на проход». Щель связи возбуждения могла находиться как в резонаторе ($r_i/R_2 < 1$), так и в планарном волноводе за его пределами ($r_i/R_2 > 1$).

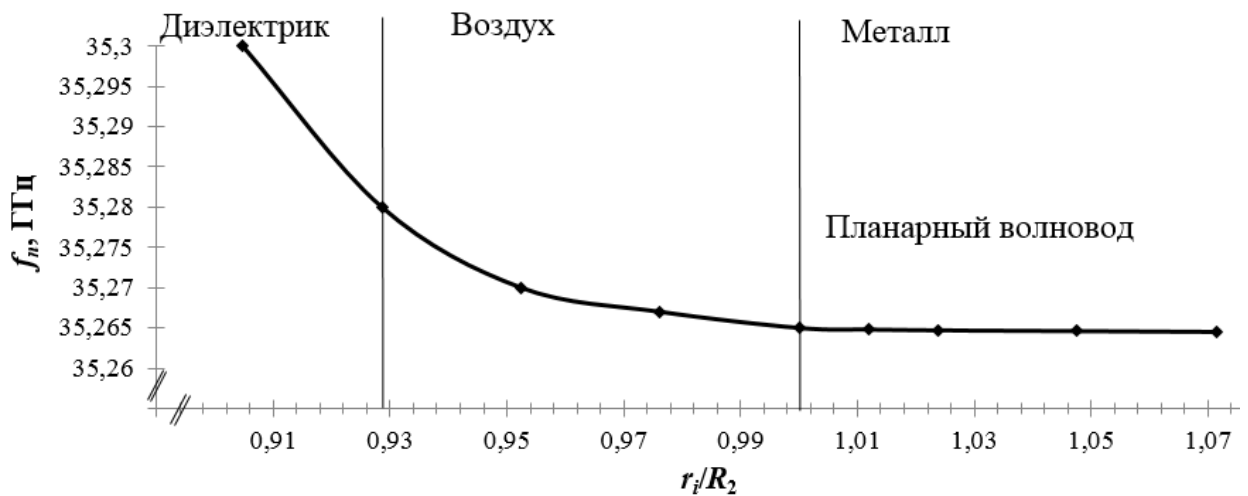


Рис. 4.3. Зависимость частоты двухслойного полушарового экранированного КДР на модах ШГ от относительной радиальной координаты щели связи.

Видно, что при возбуждении мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР планарным волноводом (щель связи за пределами резонатора) резонансная частота мало зависит от места расположения щели связи возбуждения. В то же время, при ее расположении в объеме резонатора она оказывает сильное возмущение на поля мод ШГ. Это проявляется в

появлении зависимости резонансной частоты мод ШГ от радиальной координаты щели связи. Особенно отчетливо зависимость $f_n(r_i/R_2)$ наблюдается в области локализации поля моды ШГ в диэлектрическом полушаре ($r_i/R_2 < 0,92$). При изменении относительной радиальной координаты щели связи возбуждения в интервале значений $0,94 < f_n < 1$ резонансная частота моды ШГ изменяется (увеличивается) на 35 МГц. Можно предположить, что именно на этом участке расположения щели связи поля мод ШГ в резонаторе характеризуются наибольшей интенсивностью. Возбуждение мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР планарным волноводом мало возмущает их резонансные поля. Из рис. 4.3 видно, что при r_i/R_2 частота исследуемого резонатора близка к постоянной в широком интервале изменения радиальной координаты щели связи возбуждения.

Информативной с позиций эффективности возбуждения мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР при различных способах возбуждения в нем мод ШГ (щелью связи и планарным волноводом) является зависимость параметра связи p от относительной радиальной координаты r_i/R_2 середины щели связи (рис. 4.4.).

Видно, что, во всем представленном интервале изменения радиальной координаты щели связи возбуждения достигается слабая связь ($p < 1$) с экранированным КДР. При приближении к границе резонатора кривая параметра связи выходит на пологий участок. При переходе в планарный волновод значения параметра связи наиболее малые, они близки к постоянному значению $p \approx 0,35$ и не зависят от положения щели связи по радиальной координате. Это позволяет сделать вывод о том, что при связи резонатора с планарным волноводом потери на связь минимальны и, как было показано в разделе 2, нагруженная добротность стремится к собственной добротности резонатора. Таким образом, достигается эффективная связь экранированного КДР с планарным волноводом с позиций наименьших потерь энергии на связь между ними.

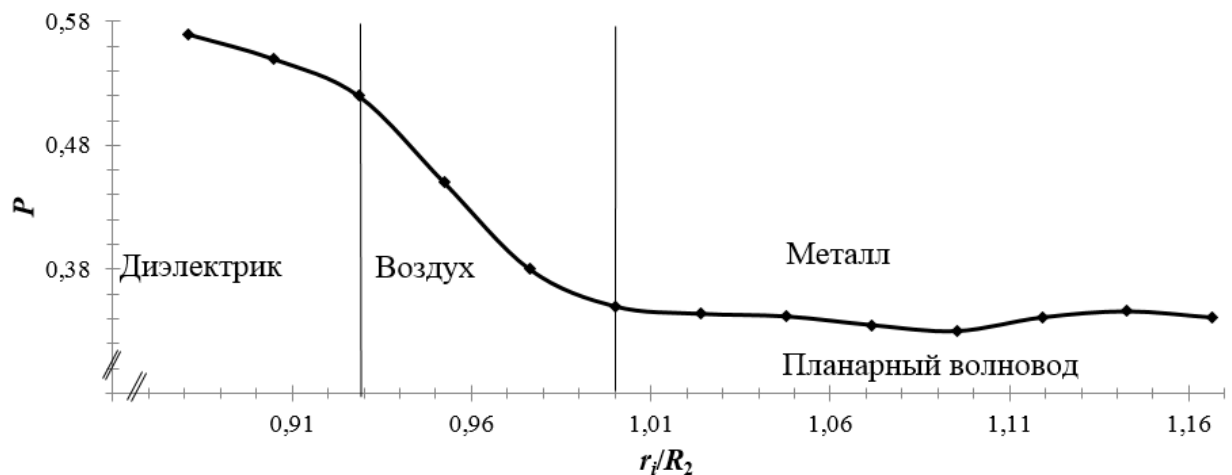


Рис. 4.4. Зависимость параметра связи двухслойного полушарового экранированного КДР с элементом возбуждения мод ШГ в нем от относительной радиальной координаты щели связи.

Использованная для проведения исследований схема включения резонатора во внешнюю цепь связи «на отражение», как отмечалось выше позволяет определить величину параметра связи и собственную добротность экранированного резонатора. Наибольший интерес вызывает исследование влияния различных способов возбуждения мод ШГ (щелью связи и планарным волноводом) в двухслойном полушаровом экранированном КДР на величину его собственной добротности. Оценить такое влияние позволяет зависимость собственной добротности Q_0 рассматриваемого экранированного резонатора от относительной радиальной координаты r_i/R_2 середины щели связи, представленная графически на рис. 4.5.

Результаты исследования собственной добротности соответствуют частоте моды ШГ $f_n \approx 35,3$ ГГц. Пунктиром показаны расчетные значения собственной добротности двухслойного полушарового экранированного КДР, полученные в работе [133].

Видно, что наибольшие значения добротности достигаются при возбуждении мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР планарным волноводом ($r_i/R_2 > 1$). Расположение щели связи внутри

резонатора приводит к существенному снижению величины Q_0 . Как показано в разделе 2, это связано с ростом потерь энергии при рассеянии волн на краях локального элемента возбуждения при его расположении на участках резонансного поля высокой интенсивности.

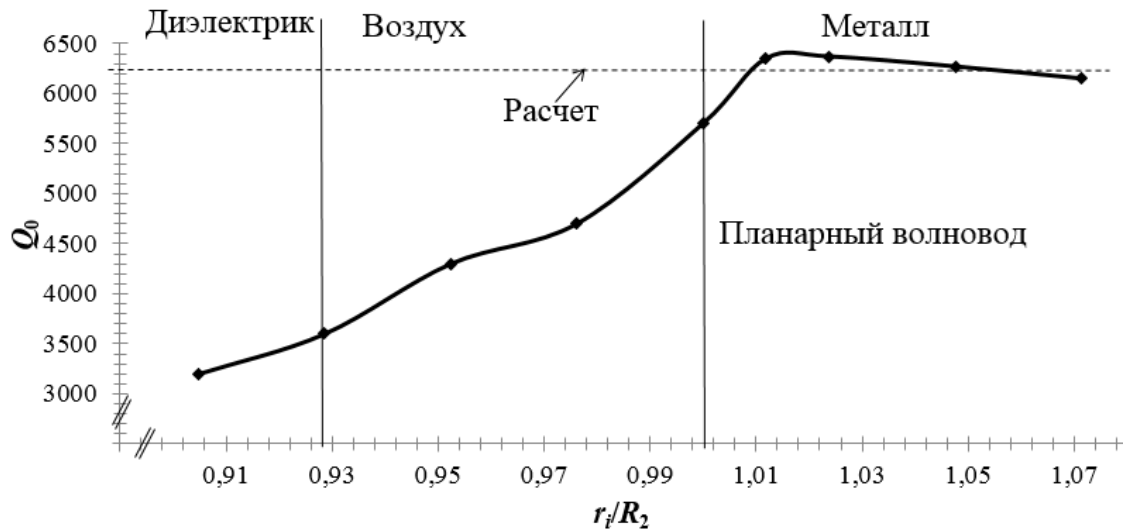


Рис. 4.5. Зависимость собственной добротности двухслойного полушарового экранированного КДР от относительной радиальной координаты щели связи.

Интересным является тот факт, что при возбуждении колебаний ШГ в исследуемом экранированном КДР планарным волноводом, достигаемые значения добротности превосходят ее пороговые значения, обусловленные потерями энергии в диэлектрическом материале резонатора. Такое пороговое значение добротности для подобного открытого КДР, изготовленного из фторопласта-4 составляет $Q_0 \approx 5,6 \times 10^3$. Необходимо отметить хорошее соответствие результатов экспериментальных исследований собственной добротности, полученных в данной работе при возбуждении мод ШГ в двухслойном экранированном КДР планарным волноводом, с расчетными результатами, представленными в работе [133].

Достигнутые высокие значения собственной добротности рассматриваемого экранированного резонатора могут найти объяснение при исследовании распределения интенсивности полей мод ШГ в двухслойном

полушаровом экранированном КДР. Оценить распределение интенсивности поля мод ШГ в разных точках в исследуемом экранированном резонаторе позволяет зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонансного отклика от относительной радиальной координаты r_0/R_2 пробного тела – пассивной щели с размерами $7,2 \times 0,2$ мм² в подвижном локальном зеркале 4 (рис. 4.1). При таком способе исследования резонансного поля мод ШГ максимум его интенсивности соответствует наименьшей амплитуде резонансного отклика. При проведении исследований по схеме «на отражение» величины A_0 и A_{max} при слабой связи с резонатором ($p < 1$) определяются следующим образом:

$$A_0 = KCBH_{max} - KCBH_0$$

$$A_{max} = KCBH_{max} - KCBH_{min},$$

где $KCBH_{max}$, $KCBH_{min}$ - максимальное и минимальное значения $KCBH$, соответственно, $KCBH_0$ - его текущее значение. После определения текущего значения амплитуды резонансного отклика выполнялась нормировка к ее наибольшему значению, таким образом, что значению величины $A_0/A_{max} = 1$, на графике зависимости $A_0/A_{max}(r_0/R_2)$ соответствовал максимум интенсивности резонансного поля (рис. 4.6). Измерения проводились при возбуждении мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР планарным волноводом при двух различных положениях щели связи вдоль радиальной координаты. Экспериментальные результаты, полученные при радиальной координате щели связи $r_i/R_2 \approx 1,13$, представлены квадратами (кривая 1), а при $r_i/R_2 \approx 1,05$ – треугольниками (кривая 2).

Видно, что при различных положениях щели связи в планарном волноводе наблюдается подобное распределение интенсивности резонансного поля. Характерным для него является изменение интенсивности на границе раздела сред диэлектрик-воздух, при котором наблюдается смещение резонансного поля мод ШГ в воздушный зазор между диэлектрическим полушаром и металлическим экраном. Интенсивность поля вблизи металла

экрана мала по сравнению с распределением поля мод ШГ в экранированных КДР без воздушного зазора (рис. 3.1). Это определяет более высокую добротность двухслойных экранированных КДР.

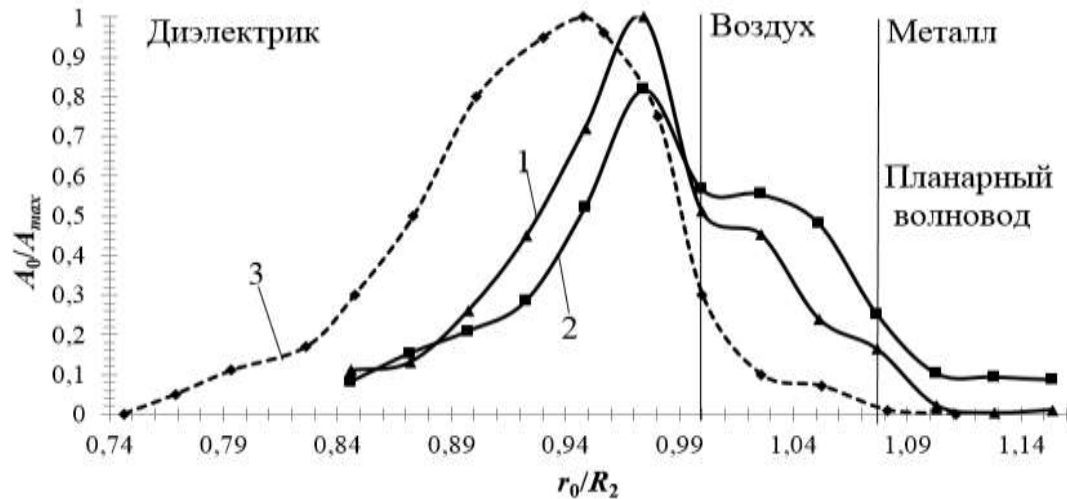


Рис. 4.6. Зависимость относительной амплитуды резонансного отклика от относительной радиальной координаты пробного тела.

Интересным является сопоставление результатов исследования распределения интенсивности полей мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР и в подобном открытом резонаторе на основе диэлектрического полушара. Зависимость относительной амплитуды резонансного отклика в полушаровом открытом КДР от радиальной координаты пробного тела представлена на рис. 4.6 пунктирной кривой 3. Видно, что в открытом полушаровом КДР резонансное поле мод ШГ в основном сконцентрировано внутри диэлектрического материала резонатора. При этом область его локализации намного шире, чем в двухслойном полушаровом экранированном КДР. Это определяет большие потери энергии резонансного поля в материале диэлектрика открытого КДР по сравнению с подобным двухслойным экранированным резонатором, и как следствие этого, меньшую собственную добротность. Добротность полушарового открытого КДР исследовалась в работе [107]. Было показано, что ее величина существенно зависит от способов возбуждения мод ШГ локальным элементом

связи. Наибольшее значение добротности полушарового открытого КДР составляет $Q_0 \approx 3000$.

Необходимо отметить, что все представленные выше результаты относились к электродинамическим характеристикам двухслойного полушарового экранированного КДР, возбуждаемого на модах ШГ. Однако, как было показано при описании спектральных характеристик такого резонатора, в нем существуют колебания, поля которых локализуются в воздушном зазоре. Проведенными исследованиями было установлено, что добротность резонатора, достигаемая при их возбуждении много меньше, чем в режиме возбуждения мод ШГ и не превышает $Q_0 < 1500$. Резонансные поля таких колебаний имеют максимум интенсивности на середине воздушного зазора и характеризуются высокой интенсивностью в области металла экрана. Это определяет высокие омические потери энергии и, как следствие, малую добротность. В области диэлектрика интенсивность их полей снижается до минимальных значений уже при расстояниях около 2 мм.

4.2. Распределение полей в планарном волноводе, связанном с двухслойным полушаровым экранированным КДР

Оценить возможности обеспечения электромагнитной связи планарного волновода с двухслойным полушаровым экранированным КДР не только на участке возбуждения колебаний, но и вывода энергии позволяет схема «на проход». Кроме того, такая схема включения резонатора во внешнюю цепь связи позволяет исследовать волновые процессы в самом планарном волноводе (рис. 4.1).

На рис. 4.7 графически показана зависимость относительной амплитуды резонанса A_0/A_{max} на выходе резонатора от относительной радиальной координаты r_i/R_2 щели связи возбуждения. Вывод сигнала из резонатора на его частоте осуществлялся с помощью щели связи вывода энергии (рис. 4.1 б). Ее радиальная координата фиксировалась таким образом, что щель связи вывода

энергии располагалась в планарном волноводе ($r_0/R_2 \approx 1,05$) на противоположной стороне резонатора относительно участка возбуждения колебаний. Сплошной кривой соединены данные соответствующие экспериментальным исследованиям, пунктиром – данные компьютерного моделирования с помощью программного пакета CST Microwave Studio 2011. Представленные результаты соответствуют резонансной частоте $f_n \approx 35,3$ ГГц.

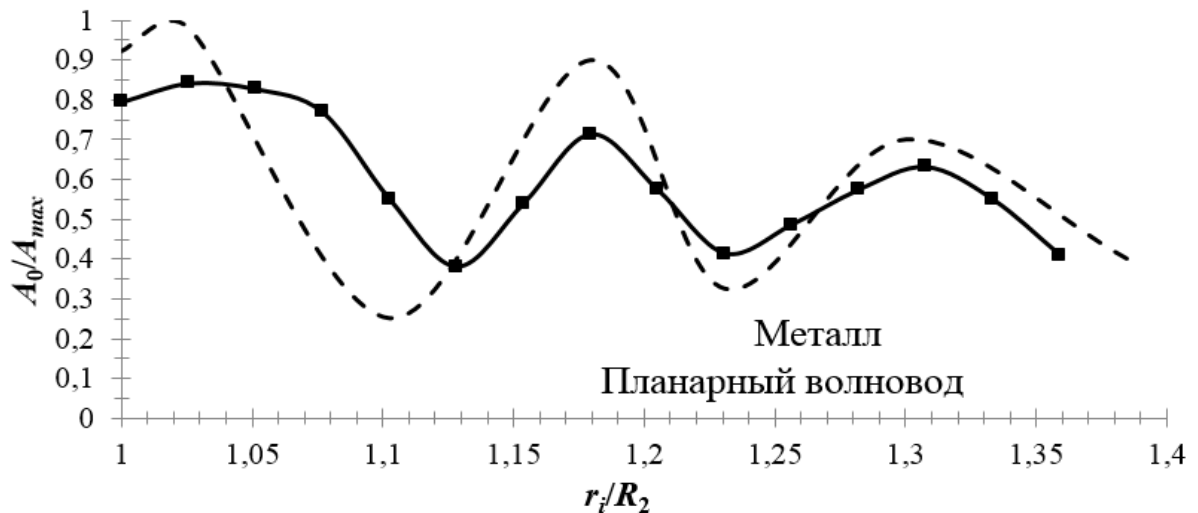


Рис. 4.7. Распределение интенсивности поля в планарном волноводе на участке возбуждения мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР.

Видно наличие характерных максимумов и минимумов амплитуды резонансного отклика, которые свидетельствуют о соответствующем распределении поля в планарном волноводе. По аналогии с возбуждением полудискового экранированного КДР можно предположить, что наличие пучностей и узлов поля в планарном волноводе, связанном с двухслойным экранированным КДР, указывают на режим стоячей волны в нем. Расстояние между соседними минимумами (максимумами) представленной на рис. 4.7 зависимости близко к половине длины волны. Очевидно, что наибольшая связь планарного волновода с полушаровым двухслойным экранированным КДР достигается при расположении щели связи возбуждения в пучности поля планарного волновода. Именно такому положению щели связи возбуждения ($r_i/R_2 \approx 1,05$) соответствует наибольшая амплитуда резонансного отклика.

Интересно отметить сравнительно малое затухание волны в планарном волноводе, поскольку значения коэффициента ослабления сигнала на частоте исследуемого резонатора в различных точках максимума отличаются незначительно. Даже при расположении щели связи возбуждения в планарном волноводе на расстояниях, превышающих длину волну, удастся достаточно эффективно возбуждать моды ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР. Сравнивая результаты экспериментального исследования и компьютерного моделирования, необходимо отметить хорошее соответствие между ними.

О наличии интерференционной картины резонансного поля моды $TM_{28\ m\ l}$ как в исследуемом резонаторе, так и в связанном с ним планарном волноводе на участке возбуждения, указывают результаты компьютерного моделирования, представленные на рис. 4.8. Отчетливо видны чередующиеся пучности и узлы резонансного поля.

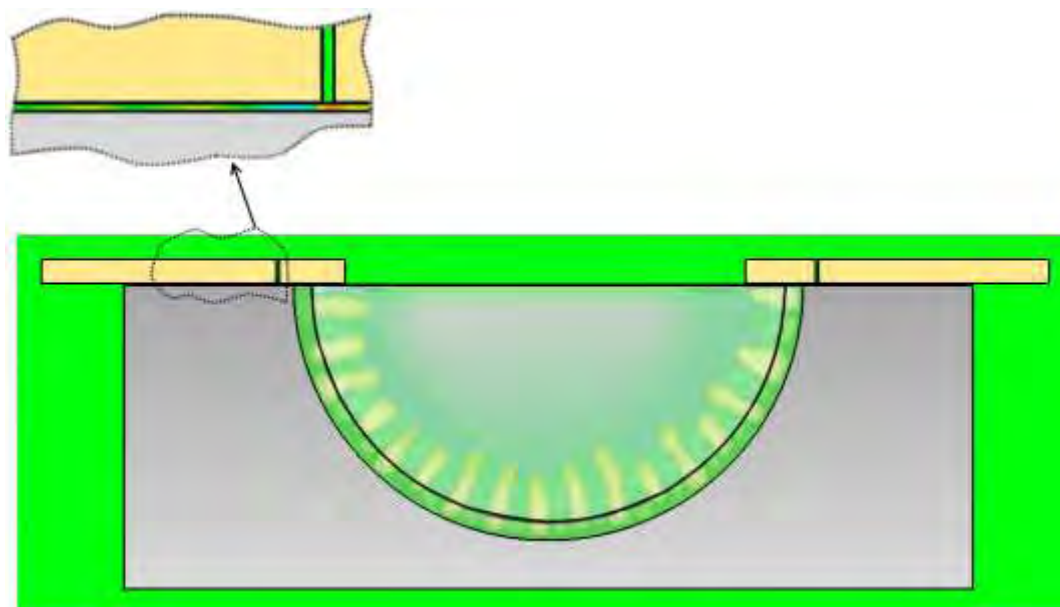


Рис.4.8. Распределение полей мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР и в планарном волноводе при их электромагнитной связи (результаты компьютерного моделирования).

Вызывает практический интерес задача изучения эффективности возбуждения мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР при

различных положениях щели связи вывода энергии в планарном волноводе и фиксированном положении щели связи возбуждения. На рис. 4.9 графически представлена зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} сигнала на частоте экранированного КДР на выходе резонатора от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии (сплошная кривая). Положение щели связи возбуждения фиксировалось в точке с $r_i/R_2 \approx 1,05$. Данные, представленные на рис. 4.9 соответствуют резонансной частоте $f_n \approx 35,3$ ГГц.

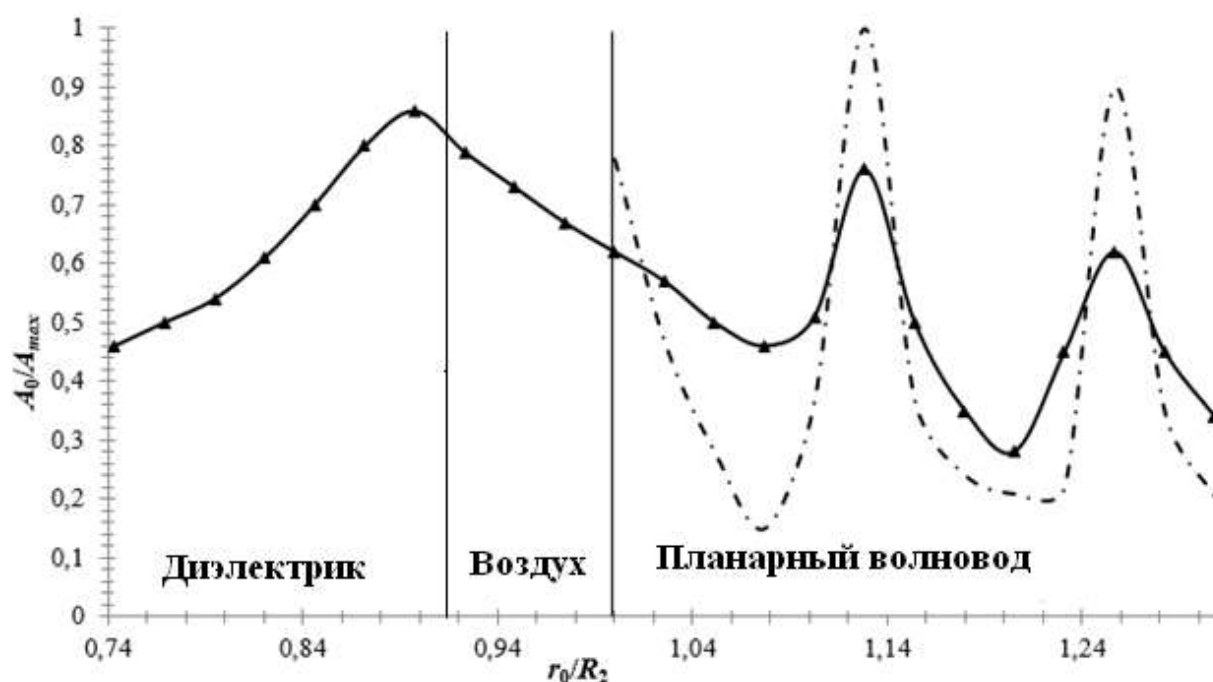


Рис. 4.9. Распределение интенсивности полей мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР и в планарном волноводе на участке вывода энергии.

Интересно, что данная зависимость позволяет не только оценить эффективность использования планарного волновода для вывода энергии резонансного поля мод ШГ из двухслойного полушарового экранированного КДР, но и изучить распределение интенсивности резонансного поля как в резонаторе, так и в планарном волноводе на участке вывода энергии.

Штрих пунктиром на рис. 4.9 показано распределение поля в планарном волноводе на участке вывода энергии из двухслойного полушарового

экранированного КДР на его частоте, полученное путем компьютерного моделирования с помощью программного пакета CST Microwave Studio 2011.

Видно, что поле резонатора проникает в планарный волновод на расстояния, превышающие длину волны. При этом амплитуда резонансного отклика на отдельных участках планарного волновода ($1 < r_0/R_2 < 1,14$) высока и близка к ее значению, достигаемому при расположении щели связи вывода энергии внутри резонатора в области полей мод ШГ. Это свидетельствует об эффективной связи планарного волновода с двухслойным полушаровым экранированным КДР при выводе из него энергии резонансного поля мод ШГ.

Также как и на участке возбуждения (рис. 4.7), наблюдается чередование узлов и пучностей поля в планарном волноводе при выводе энергии из резонатора, что указывает на режим стоячей волны в нем. При этом отмечается хорошее соответствие расчета с экспериментом.

При сравнении данных представленных на рис. 4.7 и 4.9 можно отметить, что распределение поля на частоте исследуемого экранированного резонатора в планарных волноводах на участках возбуждения и вывода энергии могут отличаться. Это может быть обусловлено двумя причинами, а именно, незначительным отличием размеров планарных волноводов и области расположения в них щелей связи возбуждения и вывода энергии. Это приведет к различию фазовых условий формирования полей мод ШГ в резонаторе на участке возбуждения и при выводе энергии из резонатора.

4.3. Электродинамические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР с асимметрией воздушного зазора.

Представленные выше результаты исследований относились к двухслойному полушаровому экранированному КДР с воздушным зазором, толщина $\Delta R = R_2 - R_1$ которого не зависела от азимутальной координаты. Другими словами, ось симметрии полусферического экрана совпадала с осью симметрии расположенного внутри него диэлектрического полушара. При

этом сохранялась симметрия воздушного зазора двухслойного экранированного резонатора. Моды такого резонатора подчинялись дисперсионному выражению (4.1).

Однако, в большинстве случаев по причине неточности изготовления элементов резонатора либо при несимметричности расположения диэлектрического полушара в металлическом экране возникает асимметричность воздушного зазора, что нарушает общую симметрию резонатора. Это приводит к появлению зависимости электродинамических характеристик двухслойного полушарового экранированного КДР от направления распространения в нем волн, образующих моды ШГ.

Параметры исследуемого двухслойного экранированного КДР и методика исследований его электродинамических характеристик приведены в данном разделе выше. Представленные ниже результаты исследования зависимостей частот, параметра связи, добротности и распределения полей мод ШГ от асимметрии воздушного зазора были получены как со стороны меньшего по толщине воздушного зазора, так и со стороны большего зазора. В эксперименте использовалась схема «на отражение». Возбуждение мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР с асимметричным воздушным зазором осуществлялось планарным волноводом, для чего щель связи возбуждения располагалась за пределами резонатора. Ее середина имела относительную радиальную координату $r_i/R_2 \approx 1,05$. Высота планарного волновода составляла $h \approx 500$ мкм, что позволяло достигать высоких значений параметра связи, как было показано в разделе 3.

На рис. 4.10 показан график зависимости резонансной частоты f_n от толщины ΔR воздушного зазора на участке возбуждения мод ШГ в двухслойном экранированном резонаторе планарным волноводом. Величине $\Delta R = 3$ мм соответствует симметрия воздушного зазора в исследуемом резонаторе.

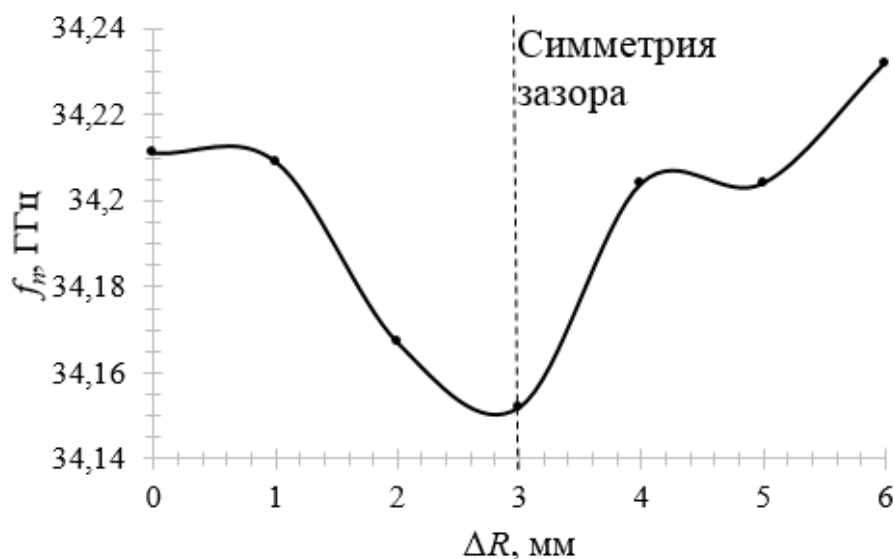


Рис. 4.10. Зависимость резонансной частоты моды ШГ от асимметрии воздушного зазора двухслойного полушарового экранированного КДР.

Видно, что зависимость частоты двухслойного полушарового экранированного КДР от асимметрии воздушного зазора в нем имеет немонотонную зависимость, близкую к симметричной. Наименьшая резонансная частота соответствует симметричному взаимному расположению диэлектрического полушара и металлического экрана. Уже при малых отклонениях от такой симметрии (до 0,5 мм) резонансная частота изменяется более чем на 10 МГц. Изменение частоты при наибольшей асимметрии воздушного зазора ($\Delta R = 6$ мм) составляет около 80 МГц.

Зависимость не только спектральных, но и энергетических характеристик двухслойного полушарового экранированного КДР от асимметрии воздушного зазора в нем наглядно демонстрируют графики зависимостей собственной добротности Q_0 и параметра связи p от величины ΔR , показанные на рис. 4.11 и 4.12, соответственно.

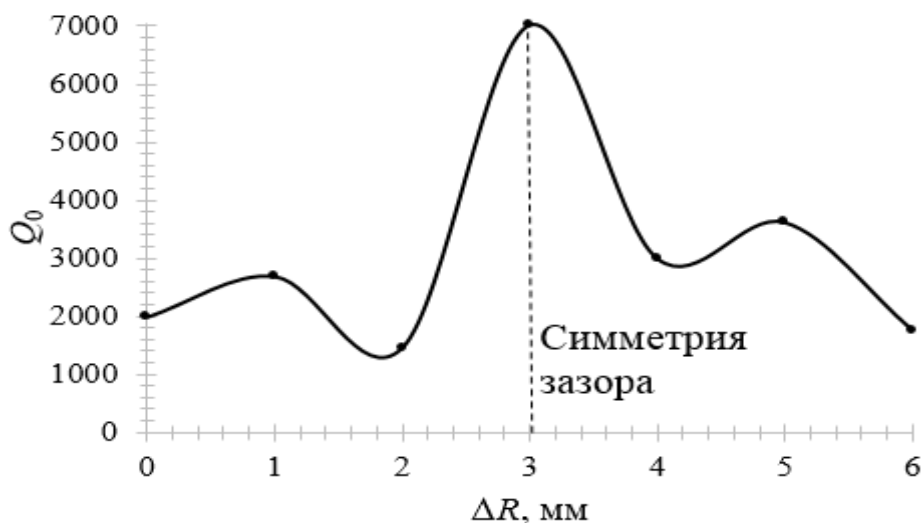


Рис. 4.11. Зависимость собственной добротности двухслойного полушарового экранированного КДР от асимметрии воздушного зазора.

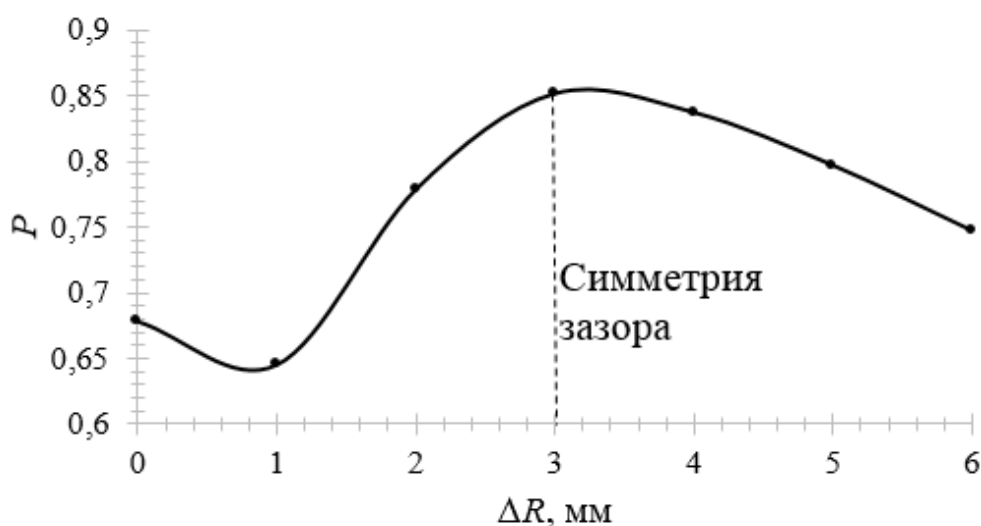


Рис. 4.12. Зависимость параметра связи планарного волновода с двухслойным полушаровым экранированным КДР от асимметрии воздушного зазора последнего.

Из рис. 4.11 видно, что даже при незначительном нарушении симметрии расположения диэлектрического полушара в металлическом экране резонатора наблюдается существенное снижение его добротности. Помимо этого асимметрия воздушного зазора приводит и к ухудшению эффективности возбуждения мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР, о

чем позволяет судить зависимость параметра связи от толщины воздушного зазора (рис. 4.12).

Ухудшение энергетических характеристик двухслойного полушарового экранированного КДР при асимметрии воздушного зазора позволяют объяснить результаты исследования радиального распределения интенсивности полей мод ШГ при различных значениях асимметрии воздушного зазора исследуемого резонатора. Исследования распределения резонансных полей колебаний осуществлялись как со стороны меньшего по толщине воздушного зазора, так и со стороны большего зазора. Наиболее характерные результаты данных исследований представлены графически на рис. 4.13 и 4.14. Штриховкой обозначена область воздушного зазора.

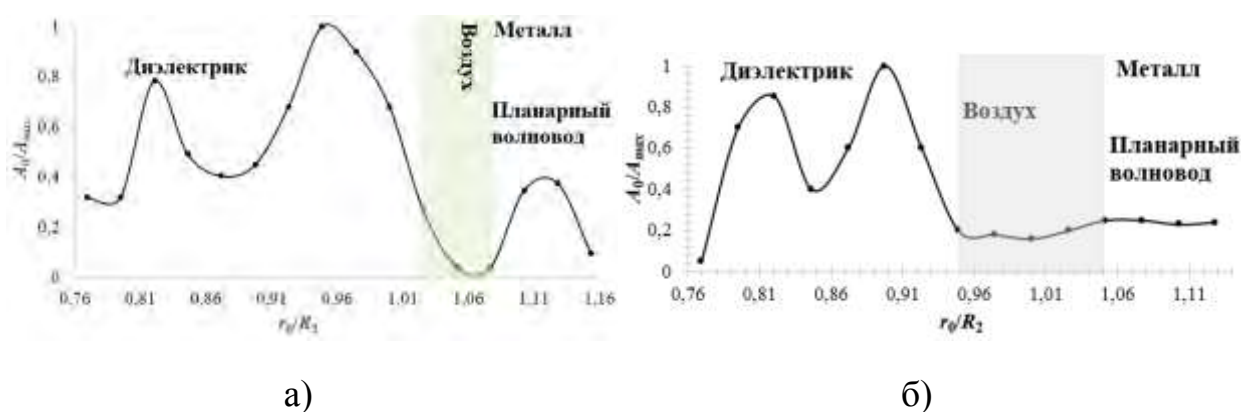


Рис 4.13. Радиальное распределение интенсивности поля моды ШГ в двухслойном экранированном КДР с воздушным зазором толщиной 2 мм (а) и 4 мм (б).

Из приведенных результатов экспериментальных исследований видно, что появление асимметрии воздушного зазора, приводит к смещению резонансного поля внутрь диэлектрического элемента резонатора по сравнению со случаем симметричного расположения диэлектрического полушара внутри металлической полусферы. При этом в области металлического экрана интенсивность резонансного поля возрастает. Вследствие этого потери энергии в диэлектрическом и металлическом элементах резонатора возрастают, что приводит к снижению добротности.

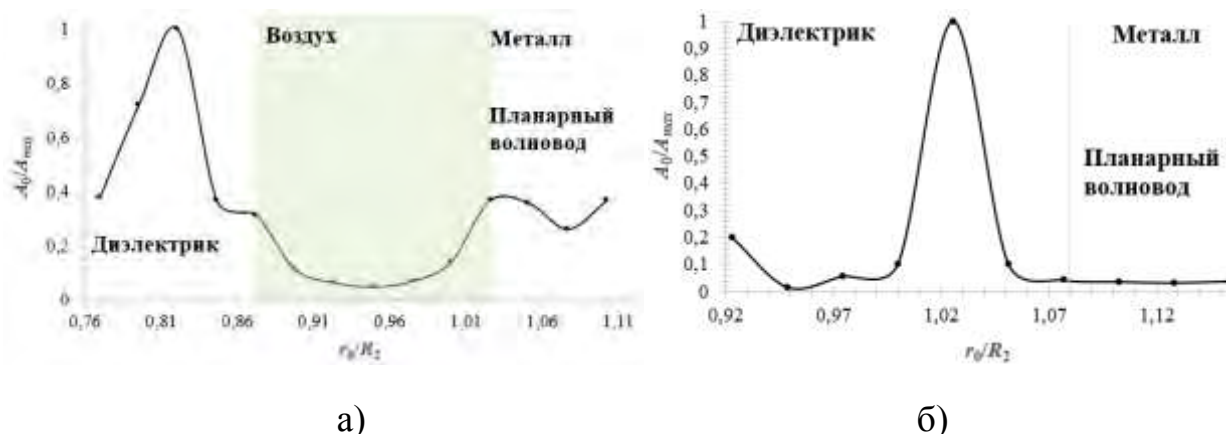


Рис 4.14. Радиальное распределение интенсивности поля моды ШГ в двухслойном экранированном КДР с воздушным зазором толщиной 6 мм (а) и 0 мм (б).

Помимо исследования режима возбуждения мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР с асимметрией воздушного зазора в работе исследовалась возможность возбуждения так называемых объемных колебаний воздушного зазора (подраздел 4.2). Было установлено, что уже при асимметрии воздушного зазора резонатора около 1 мм они не возбуждаются.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 4

Проведенными исследованиями было установлено, что использование планарного волновода как элемента возбуждения колебаний в двухслойном полушаровом экранированном КДР позволяет разредить его модовый спектр. В спектре колебаний такого резонатора присутствуют моды ШГ и колебания, поля которых локализованы в воздушном зазоре резонатора между его диэлектрическим элементом и металлическим экраном.

Показано, что планарный волновод не оказывает сильного возмущения резонансных полей мод ШГ в экранированном резонаторе. Установлено, что спектральные и энергетические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР мало зависят от места расположения элемента подвода энергии, расположенного в планарном волноводе, в отличие от возбуждения

мод ШГ локальным элементом изнутри резонансного объема. Это позволяет достигать наибольшие значения добротности исследуемого двухслойного экранированного резонатора. Экспериментально определено, что добротность двухслойного полушарового экранированного КДР, возбуждаемого на модах ШГ, при определенных соотношениях размеров диэлектрического полушара и экрана сферической формы может превосходить добротность подобного открытого резонатора. При этом значения добротности превосходят пороговое значение, определяемое потерями в диэлектрическом материале резонатора. Установлено хорошее соответствие экспериментальных результатов исследований добротности и расчетных. Результаты исследования распределения полей мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР показали, что причиной его высокой добротности является частичное смещение резонансного поля из области диэлектрика в воздушный зазор. Несмотря на то, что максимум интенсивности поля мод ШГ остается в диэлектрике, существенный участок резонансного поля, характеризующийся высокой интенсивностью, располагается в воздушном зазоре. При этом интенсивность поля вблизи металла экрана невелика.

В отличие от мод ШГ «объемные» колебания воздушного зазора резонатора характеризуются значительно меньшей добротностью. Существенный вклад в потери энергии их резонансных полей вносят омические потери в стенках металлического экрана резонатора.

Установлено, что при несимметричном расположении диэлектрического полушара резонатора и его экрана спектральные и энергетические характеристики двухслойного полушарового экранированного КДР определяются величиной асимметрии воздушного зазора. Даже малое изменение толщины воздушного зазора в одном из направлений приводит к существенному изменению резонансных частот мод ШГ и к ухудшению добротности. Показано, что основной причиной этому является рост омических потерь энергии в стенках металлического экрана.

Показано, что поле мод ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР проникает глубоко в планарный волновод при их электромагнитной связи. Это позволяет эффективно использовать планарный волновод как для возбуждения мод ШГ в таком резонаторе, так и для вывода энергии резонансного поля из него. Достигаемые значения параметра связи при возбуждении мод ШГ в рассматриваемом двухслойном экранированном резонаторе при использовании планарного волновода близки к значениям параметра связи при их возбуждении щелью связи, расположенной внутри резонатора в области локализации полей мод ШГ.

РАЗДЕЛ 5. ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭКРАНИРОВАННОГО КДР ПЛАНАРНЫМ ВОЛНОВОДОМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИЭЛЕКТРОМЕТРИИ ЖИДКОСТЕЙ

Разделы 2, 3 и 4 были посвящены исследованию электродинамических характеристик экранированных КДР с модами ШГ при возбуждении последних планарным волноводом. Было показано, что такой способ возбуждения является маловозмущающим по отношению к формированию резонансных полей мод ШГ. Кроме того, при использовании планарного волновода удастся существенно разредить спектр экранированных КДР и выделить исключительно моды ШГ. Это создает хорошие предпосылки для использования экранированных КДР в ряде пассивных и активных устройств мм диапазона длин волн.

Данный раздел диссертационной работы посвящен изучению возможности создания высокочувствительной измерительной ячейки диэлектromетра на основе экранированных КДР в режиме возбуждения мод ШГ в них планарным волноводом для исследования жидкостей с близкими электрофизическими свойствами. Задачи исследования жидкостей радиофизическими методами в настоящее время являются актуальными, поскольку имеют важное прикладное назначение. Наиболее важны они в медицине и фармакологии [66, 154-157].

Как было показано в серии работ [158-161] по изучению электрофизических свойств жидкостей измерительные ячейки резонансного типа на основе КДР с модами ШГ обеспечивают высокую чувствительность измерений. Информационными критериями оценки действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости исследуемых жидкостей являются основные спектральные и энергетические характеристики таких резонаторов. Изменение резонансных частот и добротностей КДР с модами ШГ при внесении в их резонансное поле образцов диэлектриков позволяют идентифицировать последние по величине комплексной диэлектрической

проницаемости. В большинстве случаев проведенные исследования относились к малому возмущению резонансных свойств измерительных ячеек диэлектromетров образцами исследуемых жидкостей. Это обеспечивало высокую чувствительность измерений. Однако главной проблемой при проведении подобных исследований было негативное влияние локального элемента возбуждения колебаний в используемых КДР. Как было показано в данной работе выше, локальный элемент связи является источником возмущения резонансных полей мод ШГ в различных экранированных КДР. Причем степень такого возмущения в ряде случаев может быть достаточно высока. Это приводит к изменению собственных электродинамических показателей резонаторов с модами ШГ. Естественно, что дополнительное возмущение резонансных характеристик измерительных ячеек диэлектromетров элементом возбуждения рабочих мод колебаний негативно скажется на чувствительности измерений и может быть причиной ошибки определения комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых веществ.

В связи с вышесказанным нами предлагается использование планарного волновода как элемента возбуждения мод ШГ в экранированных КДР с целью создания в дальнейшем на их основе измерительной ячейки диэлектromетра для исследования жидкостей.

В качестве базового элемента для создания измерительной ячейки диэлектromетра предлагается полый полусферический экранированный КДР. Несмотря на то, что резонатор имеет воздушное заполнение, для его описания в дальнейшем будем пользоваться уже используемой терминологией – экранированный квазиоптический диэлектрический резонатор (КДР), диэлектрический элемент которого имеет относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_0 \approx 1$. Такой резонатор наиболее удобен для размещения внутри него (в поле рабочих колебаний) различных жидкостей и контроля их объема.

5.1. Электродинамические характеристики полого полусферического экранированного КДР.

Как было показано выше, принципиальными для изучения электрофизических свойств жидкостей являются собственные спектральные и энергетические характеристики используемого резонатора. Необходимо отметить, что ранее не проводились исследования электродинамических характеристик предложенного в данной работе полого экранированного КДР полусферической формы. Для их изучения в эксперименте использовалась схема «на проход» (рис.5.1).

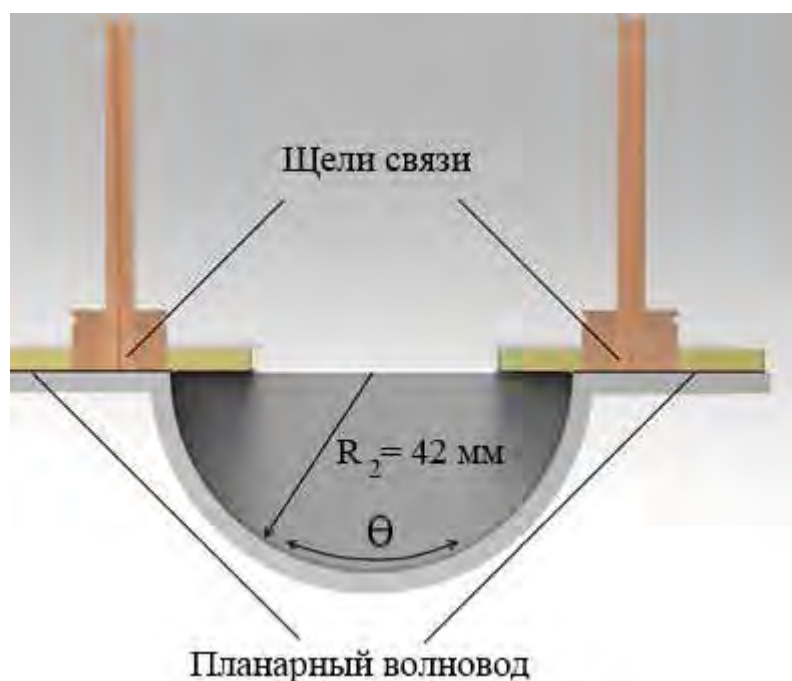


Рис. 5.1. Схематическое представление полого полусферического экранированного КДР, включенного во внешнюю цепь связи.

В работе использовался экран сферической формы двухслойного полушарового экранированного КДР, параметры которого представлены в разделе 4. Возбуждение колебаний в исследуемом резонаторе и вывод энергии из него осуществлялся посредством щелей связи, расположенных в локальных металлических зеркалах. Благодаря тому, что зеркала были подвижны в

радиальном направлении, подвод и вывод энергии из резонатора могли осуществляться как непосредственно из его резонансного объема, так и из планарного волновода. Последний, как было показано ранее, образовывался плоским основанием металлического экрана и плоскостью локального металлического зеркала. Естественная высота планарного волновода составляла около 70 мкм.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что в спектре полого полусферического экранированного КДР присутствуют колебания, резонансы которых образуют почти периодические последовательности. Период сетки резонансных частот такого резонатора составляет $\Delta f_n \approx 1,2$ ГГц.

Для идентификации возбуждаемых в резонаторе колебаний были проведены исследования распределения интенсивности их резонансных полей вдоль радиальной координаты. Информативной с этой позиции является зависимость относительной амплитуды A_0/A_{max} резонанса от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии при фиксированном положении щели связи возбуждения. Последняя располагалась за пределами резонатора в планарном волноводе и имела относительную радиальную координату $r_i/R_2 \approx 1,07$. График данной зависимости для резонансной частоты $f_n \approx 34,3$ ГГц представлен на рис. 5.2 сплошной кривой.

Видно, что характер распределения интенсивности поля колебаний, возбуждаемых в полом полусферическом экранированном КДР планарным волноводом, указывает на то, что они относятся к модам ШГ. Характерными для этого являются расположение максимума интенсивности и ширина области локализации резонансного поля. Видно, что максимум интенсивности резонансного поля расположен в непосредственной близости от металлической поверхности экрана. Само поле локализовано в узкой области, прилегающей к криволинейной границе раздела сред металл-воздух. Чередование максимумом и минимумов поля в планарном волноводе указывает на наличие стоячей волны в нем по аналогии с результатами

исследований, представленных в разделах 2 и 3. При связи с экранированным КДР резонансные поля мод ШГ глубоко проникают в планарный волновод, что обеспечивает высокую эффективность его связи с резонатором.

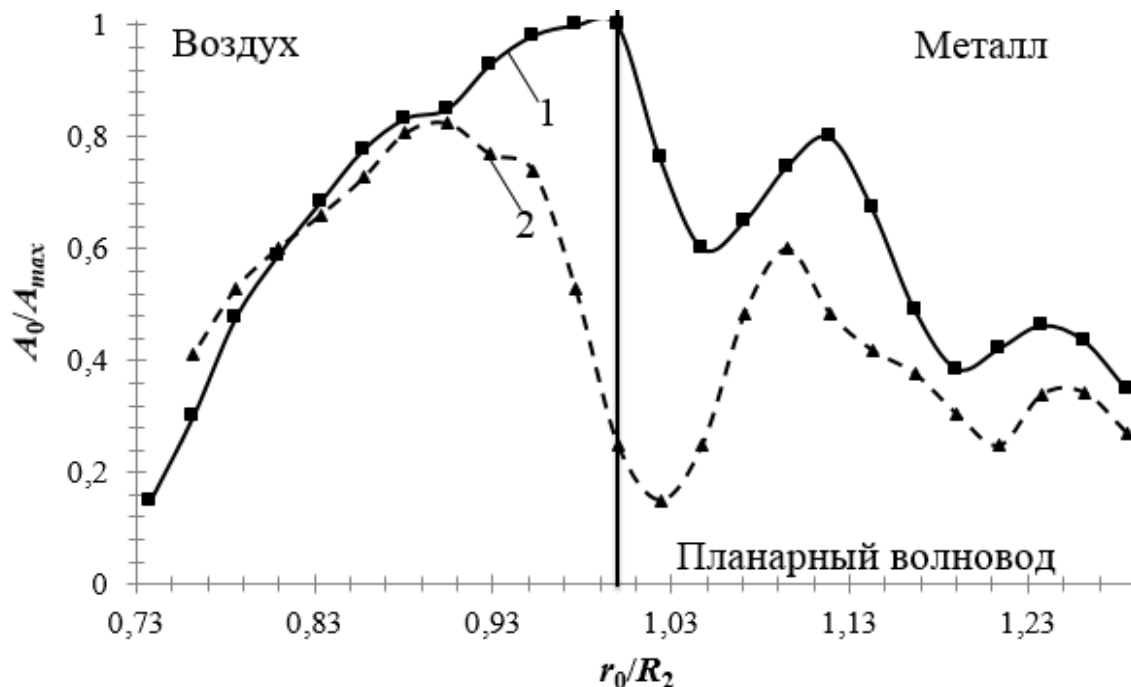


Рис. 5.2. Распределение интенсивности поля мод ШГ в полном полусферическом (сплошная кривая) и двухслойном полушаровом (пунктир) экранированных КДР и в планарном волноводе при их электромагнитной связи.

Интересно, что на сферической поверхности резонатора области локализации полей TM -мод ШГ имеют форму поясков, ориентированных в направлении распространения волн внутри полусферической полости вдоль полярной координаты θ (рис.5.1). Подобные распределения полей мод ШГ наблюдались ранее в полушаровом открытом диэлектрическом резонаторе и подробно описаны в работах [68, 94]. Максимальная ширина «пояска поля» в исследуемом полном металлическом резонаторе в среднем составляет 80 мм. При этом «поясок поля» по аналогии с полушаровым диэлектрическим резонатором характеризуется одной вариацией поля на его поперечном сечении с максимумом интенсивности в области полюса полусферической полости. Геометрические параметры «пояска поля» зависят от геометрических

размеров элемента подвода энергии и от выбора рабочей частоты. В исследуемой полосе частот на разных модах колебаний изменение ширины «пояска поля» не превышало 3%.

На принадлежность колебаний, возбуждаемых в полом полусферическом экранированном КДР планарным волноводом, к модам ШГ указывает распределение их поля внутри полого полусферического экранированного КДР вдоль полярной координаты, полученное с помощью компьютерного моделирования на основе программного пакета CST Microwave Studio 2011 (рис. 5.3).

Наглядно видны чередующиеся вдоль криволинейной поверхности резонатора пучности и узлы резонансного поля, которые определяют принадлежность колебания к $TM_{28\ 1\ 1}$ –моду ШГ. Ранее существование мод ШГ в резонаторах, образованных металлическими криволинейными зеркалами было показано в работе [162].

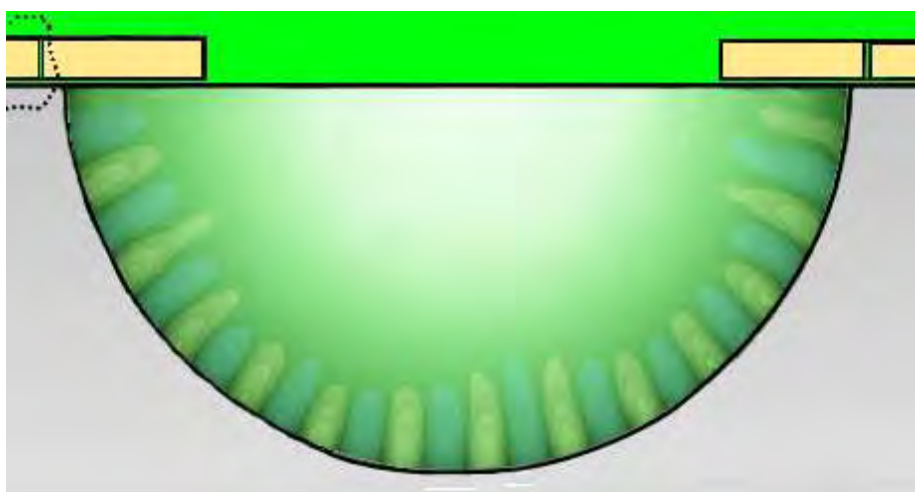


Рис. 5.3. Распределение поля $TM_{28\ 1\ 1}$ -моды ШГ в полом полусферическом экранированном КДР в режиме связи с планарным волноводом (результаты компьютерного моделирования).

Для сравнения распределения полей мод ШГ в резонаторах на основе экрана полусферической формы с различным заполнением внутреннего объема на рис. 5.2 пунктирной кривой представлено распределение

интенсивности резонансного поля ТМ-моды ШГ в двухслойном полушаровом экранированном КДР на близкой частоте. Ранее оно было исследовано в разделе 4. Сравнительный анализ результатов исследований распределения полей мод ШГ в разных экранированных резонаторах указывает на то, что полый полусферический экранированный КДР обладает меньшей добротностью по сравнению с двухслойным полушаровым экранированным КДР. Очевидно, что причиной этому являются высокие омические потери в полой резонаторе, поскольку интенсивность резонансного поля мод ШГ в нем на границе раздела сред металл-воздух существенно превосходит аналогичную величину для двухслойного экранированного резонатора. Подтверждением этому являются зависимости нагруженной добротности Q_H этих резонаторов от относительной радиальной координаты r_0/R_2 щели связи вывода энергии, представленные графически на рис. 5.4.

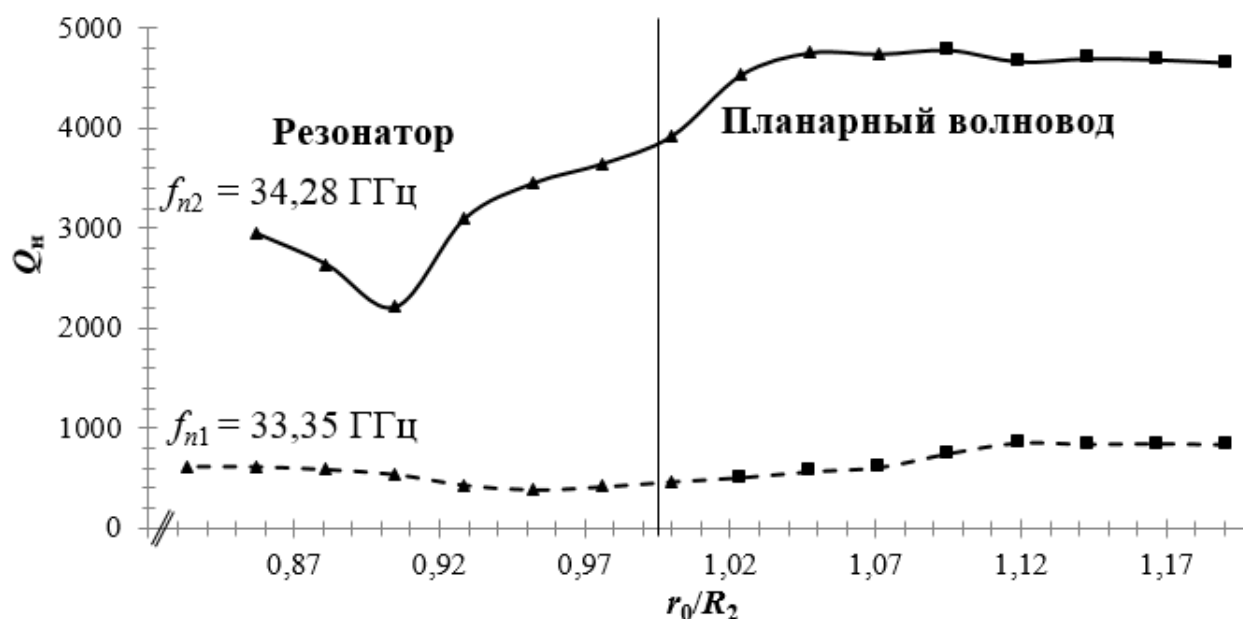


Рис. 5.4. Зависимость нагруженной добротности полого полусферического (пунктир) и двухслойного полушарового (сплошная кривая) экранированных КДР от относительной радиальной координаты щели связи вывода энергии.

Щель связи возбуждения располагалась в планарном волноводе и имела относительную радиальную координату $r_i/R_2 \approx 1,05$. Пунктиром соединены

результаты определения нагруженной добротности полого экранированного резонатора, сплошной кривой – двухслойного экранированного КДР.

Кроме сравнительного анализа добротностей данных резонаторов, представленная на рис. 5.4 зависимость позволяет качественно оценить степень влияния щели связи вывода энергии (ее положение вдоль радиальной координаты) на величину общих потерь резонансного поля мод ШГ.

Видно, что, как и предполагалось, полый полусферический экранированный КДР обладает значительно меньшей добротностью по сравнению с двухслойным экранированным резонатором. Необходимо отметить, что значения коэффициента ослабления сигнала на резонансных частотах данных резонаторов отличаются несущественно. В связи с этим можно утверждать, что и значения параметров связи с этими резонаторами близки. На основании этого можно сделать вывод о том, что и значения собственной добротности полого и двухслойного экранированных КДР находятся в таком же соотношении, что и значения их нагруженной добротности обладает более высокой добротностью по сравнению с полым металлическим экраном.

Из рис. 5.4 видно, что расположение щели связи вывода энергии внутри полости резонаторов приводит к существенному снижению их добротности за счет потерь энергии на ее краях. При этом различное расположение минимумов нагруженной добротности по радиальной координате указывает на различие в распределении интенсивности полей мод ШГ в полом полусферическом и двухслойном полушаровом экранированных КДР. Последнее предположение доказывают результаты исследования радиального распределения интенсивности полей мод ШГ в этих резонаторах (рис. 5.2).

Однако, несмотря на сравнительно невысокую добротность, полый полусферический экранированный КДР является более привлекательным для использования в качестве измерительной ячейки диэлектromетра за счет высокой концентрации поля у его криволинейной поверхности. Это создает

возможность эффективного взаимодействия полей рабочих мод ШГ с образцами исследуемых жидкостей малых объемов.

5.2. Исследование электрофизических свойств спиртосодержащих растворов.

Для проведения исследований электрофизических параметров жидкостей, в работе использовался полый полусферический экранированный КДР с модами ШГ. Электродинамические характеристики такого резонатора (рис. 5.1) рассматривались в подразделе 5.1.

В первую очередь экспериментально определялись значения резонансных частот и добротности резонатора, в объем которого помещались образцы различных жидкостей. Кроме того, методом малой возмущающей неоднородности определялись границы области локализации полей мод ШГ в резонаторе на его сферической поверхности (при изменении амплитуды резонанса на 0,1 дБ).

Для оценки чувствительности измерений в предложенной конструкции базовой ячейки резонансного типа диэлектрометра наибольший интерес вызывают исследования жидкостей с близкими электрофизическими свойствами. В эксперименте исследовались образцы различных спиртосодержащих растворов: этанол, метанол, бутанол и бензол. Дозировано (0,5 мл) образцы данных жидкостей попеременно располагались внутри измерительной ячейки в области полюса полусферической полости. Полюсом полусферы будем называть точку на ее поверхности, через которую проходит ось симметрии резонансной структуры на ее основе. Таким образом, полость резонатора лишь частично заполнялась образцами исследуемых жидкостей.

Необходимо отметить, что поскольку элемент возбуждения колебаний располагался за пределами резонатора, его возмущающее влияние на форму резонансной кривой было минимальным. Резонансная кривая, регистрируемая в эксперименте, имела симметричную форму. Погрешность определения добротности, связанная с систематической погрешностью измерения частоты,

в эксперименте не превышала 7%. Влияние случайных погрешностей, связанных с нестабильностью частоты генератора, нелинейностью АЧХ, изменением внешних факторов и т.д. минимизировалось путем многократных измерений.

На рис. 5.5, 5.6 и 5.7, соответственно, представлены графики зависимостей изменения резонансной частоты δf_n относительно воздушного заполнения резонатора, коэффициента ослабления α и значения нагруженной добротности Q_n от объема V исследуемой жидкости. Представленные данные соответствуют измерениям, проведенным на частотах, близких $f_n \approx 35,84$ ГГц.

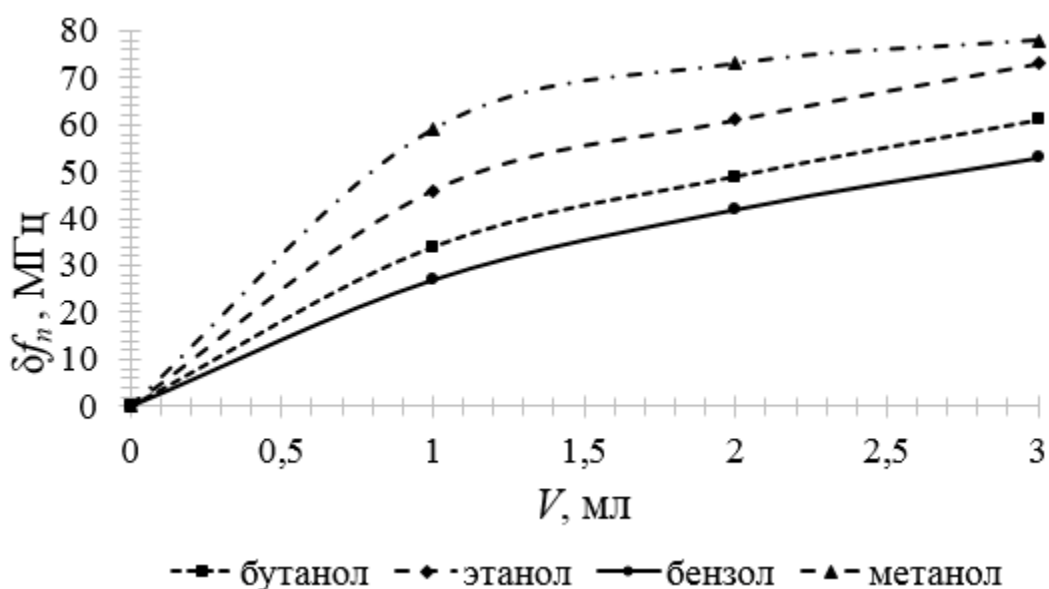


Рис. 5.5. Зависимость изменения резонансной частоты полого полусферического экранированного КДР от объема исследуемых жидкостей.

Возбуждение мод ШГ в полном полусферическом экранированном КДР осуществлялось планарным волноводом ($r_i/R_2 \approx 1,07$).

Из рис. 5.5 видно, что при частичном (малом до 3 мл) заполнении полости резонатора всеми исследуемыми образцами жидкостей, наблюдается уменьшение резонансной частоты f_n . Различные жидкости при этом оказывают разное влияние на изменение абсолютного значения величины f_n . Видно, что наибольшее влияние на изменения резонансной частоты $\delta f_n^M = 79$ МГц при 3 мл исследуемого образца оказывает метанол, а наименьшее $\delta f_n^6 = 52$ МГц –

бензол, что качественно согласуется с данными о значении диэлектрической постоянной данных жидкостей [163].

Информативными с точки зрения потерь энергии резонансного поля в исследуемых жидкостях являются зависимости коэффициента ослабления α и нагруженной добротности Q_n от объема последних (рис. 5.6 и 5.7).

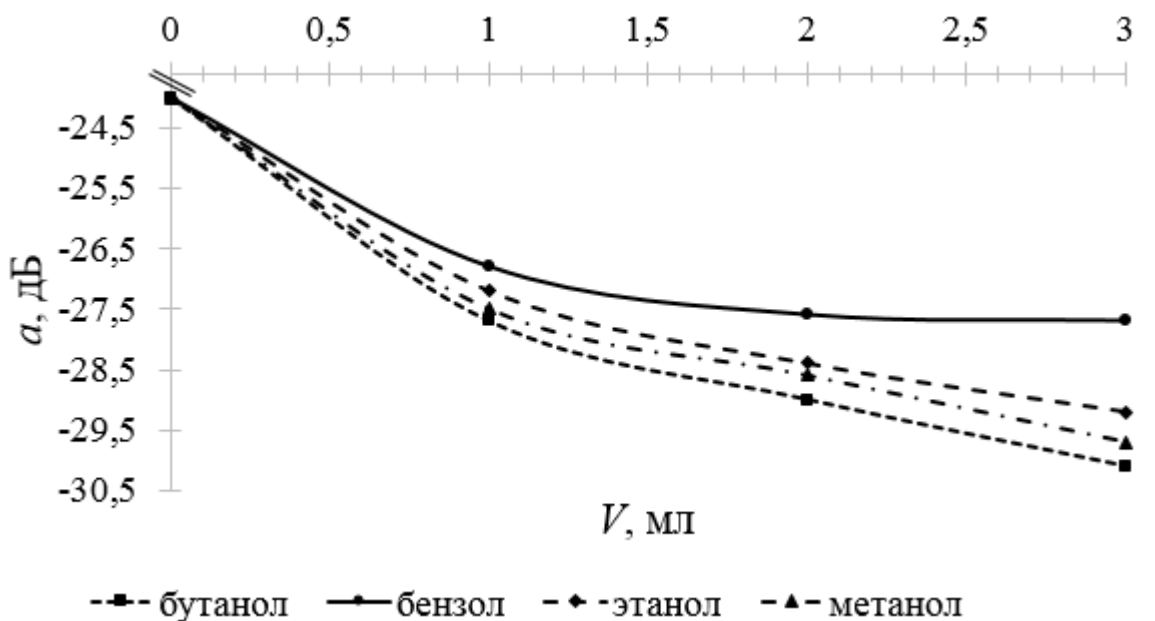


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента ослабления сигнала на выходе резонатора от объема исследуемых жидкостей.

Видно, что все исследуемые жидкости характеризуются высокими потерями, поскольку расположение их даже в малом объеме внутри измерительной ячейки приводит к существенному ослаблению сигнала на выходе резонатора. Причем наибольшее ослабление сигнала наблюдается при самых малых объемах жидкостей (до 1 мл). При более высоких объемах кривые ослабления выходят на более пологий участок.

Результаты определения добротности полого полусферического экранированного КДР при ее частичном (малом) заполнении образцами исследуемых жидкостей, представленные на рис. 5.7, также отображают потери энергии электромагнитного поля в них. Видно, что потери энергии, вызванные частичным заполнением полости резонатора различными жидкостями, приводят к общему снижению добротности. При этом, как и в

случае изменения резонансной частоты, заметно различное влияние образцов разных жидкостей на поведение добротности. Наибольшие потери энергии ($Q_n^M=440$ при 3 мл) отмечаются при частичном заполнении полости резонатора метанолом, а наименьшие ($Q_n^6=675$ при 3 мл) – бензолом, что соответствует данным о тангенсе угла потерь данных жидкостей [163].

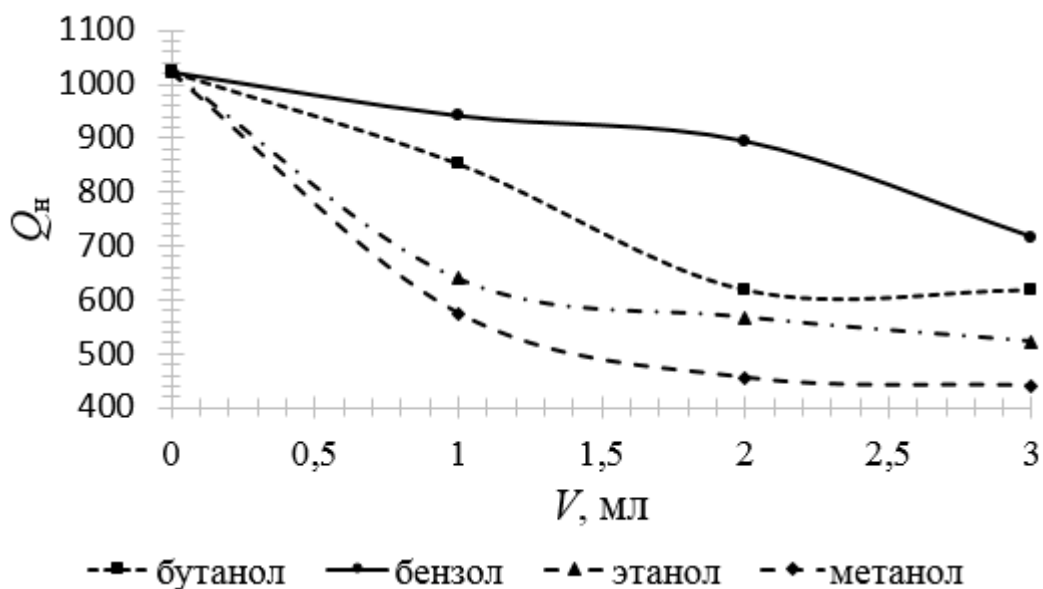


Рис. 5.7. Зависимость нагруженной добротности полого полусферического экранированного КДР от объема исследуемых жидкостей.

Необходимо отметить, что результаты исследования зависимостей, представленных на рис. 5.5, 5.6 и 5.7 для этанола и бутанола, также соответствуют представлениям об электрофизических свойствах данных жидкостей. При этом различия в значениях резонансных частот и добротностей при исследовании образцов различных жидкостей являются очевидными, что позволяет их идентифицировать.

Следует обратить внимание, что при малых объемах (до 3 мл) заполнения полости резонатора образцами исследуемых жидкостей резонансное поле мод ШГ не претерпевает существенных изменений, поскольку границы области его локализации практически не меняются. При дальнейшем увеличении объемов возмущение резонансного поля исследуемыми жидкостями становится очевидным. Изменяются границы

области локализации резонансного поля мод ШГ, что объясняется его возмущением жидкостями больших объемов. Это проявляется в существенном расширении «пояска поля». Наибольшее различие проявляется при достаточно больших объемах жидкостей $V > 10$ мл. При $V = 20$ мл «поясок поля» при заполнении измерительной ячейки бензолом расширяется до 106 мм, а этанолом – до 124 мм. С позиций исследования электродинамических характеристик полого полусферического экранированного КДР эффект «выталкивания» резонансного поля жидкостями приводит к тому, что данные об изменении резонансной частоты и нагруженной добротности становятся неинформативными.

Влияние условий возбуждения рабочих мод ШГ в представленном резонаторе локальным элементом связи на чувствительность проведенных измерений наглядно демонстрируют графики зависимостей изменения резонансной частоты и нагруженной добротности от объема исследуемых жидкостей при расположении щели связи возбуждения внутри резонатора $r_i/R_2 \approx 0,88$ в области максимума интенсивности полей мод ШГ (рис. 5.8 а, б).

Как было показано выше при описании электродинамических характеристик различных экранированных КДР, локальный элемент возбуждения мод ШГ вносит возмущение в поведение резонансных полей колебаний. При этом степень возмущения в случае расположения элемента возбуждения (связи) в поле рабочих колебаний может быть существенной. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению чувствительности измерений электрофизических свойств жидкостей, т.к. поле рабочих мод ШГ в измерительной ячейке возмущается двумя факторами одновременно (элементом связи и образцом жидкости). По этой причине отличительные признаки исследуемых жидкостей по изменению резонансных частот и нагруженной добротности становятся неразличимыми. Данные представленные на рис. 5.8 наглядно это демонстрируют.

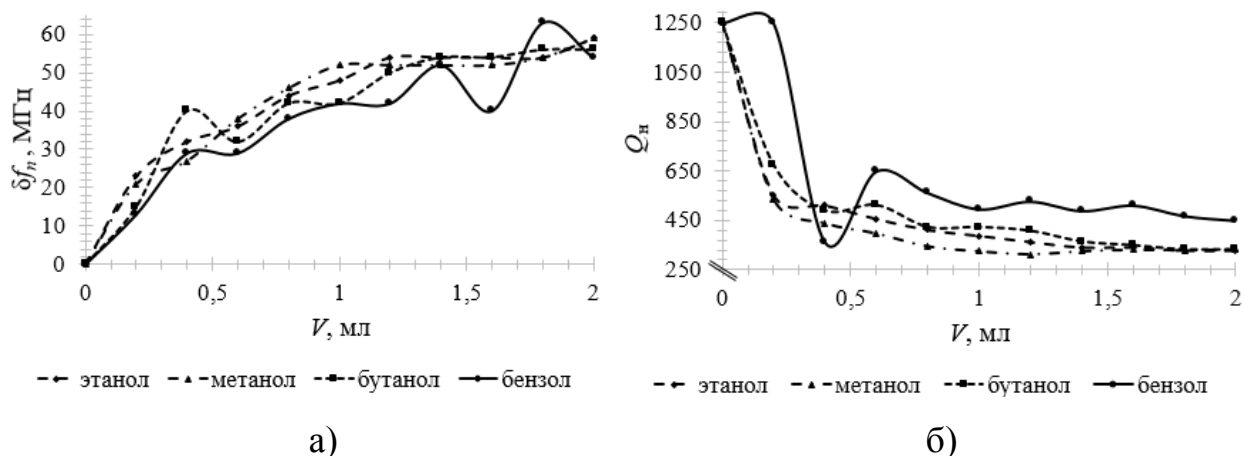


Рис. 5.8. Зависимости изменения частоты (а) и нагруженной добротности (б) полого полусферического экранированного КДР от объема исследуемых жидкостей при возбуждении мод ШГ щелью связи, расположенной внутри резонатора.

Таким образом, учет влияния условий возбуждения рабочих типов колебаний в резонаторе необходим в дальнейшем при создании на его основе измерительной ячейки диэлектromетра. Степень возмущения резонансного поля рабочих мод элементом их возбуждения должна быть минимизирована.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 5

Проведенные экспериментальные исследования электродинамических характеристик полого полусферического экранированного КДР показали, что в нем возбуждаются моды ШГ как при использовании локального элемента связи (емкостной щели), так и планарного волновода. Поля мод ШГ, локализуются в резонаторе в узкой области вблизи его криволинейной поверхности таким образом, что максимум их интенсивности располагается непосредственно вблизи границы раздела сред воздух-металл. Это создает возможность эффективного взаимодействия резонансных полей мод ШГ с различными материалами в целях исследования их электрофизических свойств. Сама измерительная ячейка диэлектromетра на основе такого резонатора, не смотря на его невысокую добротность, является

привлекательной при измерении диэлектриков в малых объемах, в том числе и с высокими потерями энергии.

Предложена конструкция измерительной ячейки диэлектromетра на основе полого полусферического экранированного КДР для исследования жидкостей с близкими электрофизическими свойствами. Установлено, что благодаря использованию планарного волновода для возбуждения рабочих мод ШГ в таком резонаторе удастся минимизировать сторонние факторы возмущения резонансных полей колебаний, и, тем самым, достичь высокой чувствительности измерений.

Проведены исследования образцов различных спиртосодержащих жидкостей таких как, бензол, бутанол, этанол и метанол. Показано, что достигнутая высокая чувствительность измерений позволяет однозначно идентифицировать их по изменению электродинамических характеристик полого полусферического экранированного КДР.

Выработаны рекомендации относительно объемов образцов исследуемых жидкостей. Показано, что используемая методика исследования электрофизических параметров различных жидкостей в представленной измерительной ячейке имеет ограничения по величине возмущения резонансного поля жидкостями в зависимости от объема последних.

ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи современной радиофизики – усовершенствованию известных способов возбуждения мод шепчущей галереи (ШГ) локальными источниками в экранированных квазиоптических диэлектрических резонаторах (КДР) с целью минимизации их возмущающего влияния на резонансные поля рабочих мод колебаний. Экспериментально исследована зависимость основных электродинамических характеристик экранированных КДР разных форм от условий возбуждения в них мод ШГ локальными элементами связи. Расширены функциональные возможности по порогу чувствительности диэлектрометров мм волн, предназначенных для исследования электрофизических свойств жидкостей. Практическое значение полученных результатов заключается в разработке нового способа возбуждения мод ШГ планарным волноводом в высокочастотных экранированных КДР, а также усовершенствованию пассивных устройств мм диапазона длин волн с улучшенными функциональными возможностями, которые найдут применение при решении широкого круга научных и прикладных задач радиофизической науки.

Основные научные и прикладные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Предложен новый способ эффективного возбуждения мод ШГ в экранированных КДР планарным волноводом, образованным плоскостью металлического зеркала резонатора и плоским основанием его металлического экрана.
2. Установлено, что значения коэффициента передачи при возбуждении мод ШГ в экранированных КДР планарным волноводом мало зависят от места

расположения в нем элемента подвода энергии по радиальной координате на расстояниях, сравнимых с длиной волны. Это определяет высокую эффективность возбуждения мод ШГ в экранированных КДР планарным волноводом.

3. Экспериментально показано, что частотные и энергетические характеристики экранированных КДР при их связи с планарным волноводом мало зависят от выбора радиальной координаты элемента подвода энергии к планарному волноводу. Тем самым предложенный в работе способ возбуждения мод ШГ в экранированных КДР планарным волноводом является маловозмущающим по сравнению с известными способами возбуждения мод ШГ в закрытых резонаторах.
4. Экспериментально и путем компьютерного моделирования установлено, что в планарном волноводе при электромагнитной связи с экранированными КДР наряду с режимом бегущей волны возможен режим стоячей волны по причине возбуждения отраженной от его краев обратной волны. Это проявляется в образовании характерных узлов и пучностей поля в планарном волноводе с расстоянием между соседними, близким к половине длины волны.
5. Экспериментально решена задача разрежения густого спектра экранированных КДР с приоритетным выделением мод ШГ путем использования планарного волновода. Показано, что при возбуждении мод ШГ в экранированных КДР, подвод энергии электромагнитного поля внешнего источника осуществляется непосредственно к области локализации полей мод ШГ. Другие типы колебаний, поля которых глубже расположены внутри объема резонатора, планарным волноводом не возбуждаются в отличие от использования локальных элементов возбуждения (связи).

6. Показано, что при включении экранированных КДР во внешнюю цепь связи с планарным волноводом по схеме «на проход» достигаются условия не только эффективного возбуждения, но и вывода энергии резонансных полей мод ШГ. Разреженный спектр выходного сигнала позволяет рассматривать такую схему включения резонатора как фильтр резонансного типа с хорошими селективными свойствами.
7. Путем использования планарного волновода экспериментально доказана возможность возбуждения «сверхвысокодобротных» мод ШГ в двухслойных (диэлектрик-воздух-металл) полушаровых экранированных КДР. Установлено, что при определенных соотношениях размеров металлического экрана таких резонаторов и полушаровой диэлектрической структуры и их симметричном взаимном расположении достигается собственная добротность, превосходящая пороговое значение, обусловленное потерями энергии в диэлектрическом материале резонатора. Показано, что причиной этому является частичное смещение резонансного поля мод ШГ из диэлектрика в воздушный зазор. При этом интенсивность резонансного поля на стенках металлического экрана мала.
8. Изучены электродинамические характеристики полого полусферического экранированного резонатора. Установлено, что в нем наряду с резонаторами с диэлектрическим заполнением внутреннего объема, возбуждаются моды ШГ. Их поля локализованы в непосредственной близости от внутренней криволинейной поверхности. Это создает возможность эффективного взаимодействия резонансных полей мод ШГ с различными материалами с целью изучения их электрофизических свойств.
9. Предложена конструкция измерительной ячейки диэлектromетра на основе полого полусферического экранированного КДР для исследования

жидкостей с близкими электрофизическими свойствами. Установлено, что благодаря использованию планарного волновода для возбуждения рабочих мод ШГ в экранированном резонаторе удастся минимизировать сторонние факторы возмущения резонансных полей колебаний, и, тем самым, достичь высокой чувствительности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л. А. Вайнштейн – М.: Сов. радио, 1966. – 475 с.
2. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ / А. Д. Григорьев – М.: Высшая школа, 1990. – 336с.
3. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах / Э. Л. Гинзтон – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 519 с.
4. Андросов В.П. Влияние внутренних неоднородностей открытого резонатора на связь его колебаний с волноводными линиями / В.П. Андросов, И.К. Кузьмичев – Х.: Институт радиофизики и электроники АН УССР, 1987. Препринт № 355. 14с.
5. Дюбко С.Ф. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / С.Ф. Дюбко и др; Под ред. Р.А.Валитова, Б.И. Макаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – 296с.
6. Kirichenko A.Ya. Dielectrometer measuring cel for investigation of liquids with high losses and high dielectric constant designed in form of the two – layer semispherical teflon resonator / A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, I.G. Maksimchuk, V.A. Solodovnik, S.O. Nosatiuk // Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium,(MSMW'2010), June 21-26, 2010: Symp. Proc. – Kharkov, Ukraine, 2010.
7. Кириченко А.Я. Полушаровой диэлектрический резонатор с концентрической полушаровой выборкой для диэлектromетрии жидкостей / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 20^{ая} Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2010), 13-17 сентября 2010г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2010– Т.2.– С.1010-1011.
8. Кириченко А.Я., Резонансный метод для определения диэлектрических характеристик смеси мелкодисперсных сыпучих материалов в 8-мм диапазоне длин волн / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г.

- Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 20^{ая} Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2010), 13-17 сентября 2010г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2010 – Т.2.– С.1012-1013.
9. Кириченко А.Я. Полый полушаровой диэлектрический резонатор для диэлектрометрии жидкостей / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т.16, №2.– С. 90-93.
 10. Когут А.Е. Полушаровой диэлектрический резонатор с концентрической полушаровой выборкой для диэлектрометрии спиртоводных растворов / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, И.Г. Максимчук, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // 22^{ая} Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2012), 10-14 сентября 2012г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2012– Т.2. – С.845-846.
 11. Kirichenko A.Ya. Excitation of whispering gallery modes in shielded dielectric resonator by “slot-line” / A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, V.A. Solodovnik, S.O.Nosatiuk // Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: International. Kharkov Symposium, (MSMW'2013), June 23-28, 2013: Symp. Proc. – Kharkov, Ukraine, 2013 – P. 268-270
 12. Кириченко А.Я., Возбуждение колебаний шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, С.О. Носатюк, Солодовник В.А. // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2013. – Т. 56, № 8. – С. 24-32.
 13. Когут А.Е. Возбуждение высокочастотных колебаний шепчущей галереи в полушаровом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией» / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2014. – Т. 54, №7. – С.588-595.
 14. Когут А.Е. Реализация режима вынужденных колебаний высших порядков в экранированных диэлектрических резонаторах путем использования щелевой линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 25-33.

15. Когут А.Е. Возбуждение высокочастотных колебаний шепчущей галереи в полушаровом экранированном диэлектрическом резонаторе «щелевой линией» линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, В.А. Солодовник, Р.С. Доля // 24^{ая} Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'2014), 7-13 сентября 2014г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2014– Т.2.– С. 613-614
16. Kogut A.E., The slot-line as element of excitation of quasioptic hemispherical resonators for the solving problems of dielectrometry liquids / A.E. Kogut, S.O. Nosatiyk, R.S. Doliya// International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015) September 29 – October 2, 2015: Symp. Proc. – Dnipropetrovsk, Ukraine, 2015
17. Когут А.Е., О перспективах использования щелевой линии как элемента возбуждения квазиоптического полусферического резонатора при решении задач диэлектromетрии жидкостей линии / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2016. -Т. 59, №4 – С. 19-25.
18. Когут А.Е., He Jaochan Возбуждение мод шепчущей галереи в экранированных диэлектрических резонаторах щелевой линией связи / А.Е. Когут, С.О. Носатюк, Р.С. Доля, He Jaochan // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), №3.– С. 49-54.
19. Смирнов А.А. Корпоративные системы спутниковой связи / А. А. Смирнов. – М.: Эко-Тренз, 1997. –132с.
20. Любченко В.Е. Линии связи миллиметрового диапазона волн в локальных информационных сетях / В.Е. Любченко, А.В. Соколов, Л. В. Федорова // Радиотехника. – 1998. –№ 12. –С. 68-75.
21. Ослабление и рассеяния УКВ в городах и пригородных зонах / Под ред. Г.А. Пономарева, А.В. Соколова // Сер. Радиотехника, ВИНТИ АН СССР. –1991. –Т. 42. –193с.
22. Нарытник Т.Н. Телекоммуникационные системы и технологии миллиметрового диапазона волн / Т.Н. Нарытник, С.А. Кравчук,

- В. П. Потиеенко // 7^{ая} Международная Крымская конференция. (КрыМиКо'1997), 15-18 сентября 1997г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 1997. –Т.1. –С.50-55.
- 23.Справочник по радиолокации/Под ред. М. Сколника. – М.: Сов. Радио, 1976. –Т.1. Основы радиолокации. -456с.
24. Seashore C.R. MM-wave Radar and Radiometric Sensors for Guidance Systems /C.R. Seashore, J.E. Milley, B.A. Kearns // Microwave J. – 1979. –V.22, №8. – P. 47-51.
- 25.Антюфеев В.И. Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, В.А. Краюшкин, Р.П. Гахов. Монография. – М.: Физматлит. 2009. – 352 с.
- 26.Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наукова думка, 1987. –230с.
- 27.Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А. М. Шутко. – М.: Наука, 1986. – 188с.
- 28.Хлопов Г. И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне / Г. И. Хлопов // Зарубежная радиэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №9. – С. 3-27.
- 29.Тоцкий А. В. Радиолокационное распознавание движущихся наземных объектов в миллиметровом диапазоне длин волн / А.В. Тоцкий, А. Л. Теплюк, В. Е. Морозов и др. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2008. – №12. –С. 35-45.
- 30.Паршина С.С. Современные данные о механизмах действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона и его использование в кардиологии / С. С. Паршина // Эфферентная терапия. – 2005. – Т. 11, № 4. – С. 39-47.

31. Кабисов Р.К. Миллиметровые волны в системе реабилитации онкологических больных / Р.К. Кабисов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 1998. – № 1. – С. 48-55.
32. Афромеев В.И. О возможном корреляционном механизме активации собственных электромагнитных полей клеток организма при внешнем облучении / В. И. Афромеев, Т. Н. Субботина, А.А. Яшин // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1997. – № 9-10. – С. 28-34.
33. Бецкий О.В. Механизмы взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами / О. В. Бецкий, Н.Д. Девятков // Радиотехника. – 1996. – Т. 41, № 9. – С. 4-11.
34. Хлопов Г.И. Развитие научных исследований в отделе физических основ радиолокации ИРЭ НАН Украины / Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 13, спец. вып. – С. 321-332.
35. Буренин Н.И. Стабилизация частоты генераторов СВЧ. / Н.И.Буренин, Р.Т. Сафаров // – М.: Советское радио, 1962.
36. Гвоздев Б.Н. Частотные шумы твердотельных генераторов в режимах комбинированной параметрической и электрической стабилизации частоты / Б.Н. Гвоздев, В.Н. Ештокин, С.С. Зырин, А.А. Пелевин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – № 4. – С. 24-28.
37. Бородкин А.И. Полупроводниковый генератор с колебательной системой-открытый резонатор с отражательной решеткой. / А.И. Бородкин, Б.М. Булгаков, В.В. Смородин // Письма в ЖТФ. – 1980, Т. 6, №10, – С.1189-1193.
38. Фисун А.И. Квазиоптические твердотельные источники излучения: принципы построения, тенденции развития и перспективы приложений. / А.И. Фисун, О.И. Белоус //Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №4, – С 41-64.

39. Царапкин Д.П. Применение диэлектрических резонаторов с волнами типа «шепчущей галереи» для стабилизации частоты автогенераторов СВЧ / Д.П. Царапкин // Радиотехника. – 2002. – № 2. – С. 28-35.
40. Шестоपालов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники / В.П. Шестоपालов. – Киев: Наукова думка, 1985. – Т.1. Открытые структуры. – 216с. – Т.2. Источники, элементная база.- Радиосистемы. – 256с.
41. Генераторы дифракционного излучения / Под ред. В.П. Шестопалова –К.: Наук. думка, 1991. – 320 с.
- 42.Еремка В.Д. Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины / В.Д. Еремка, О.П. Кулагин, В.Д. Науменко и др. // Радиофизика и электроника. – 2004. – Т. 9, спец. вып. – С. 42–67.
43. Омиров А.А. О перспективах создания коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А.А. Омиров // Радиофизика и электроника. – 2012. –Т.3(17), №4. –С. 76-79.
44. Скрипкин Н. И. Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: Новые разработки компании «Плутон» / Н. И. Скрипкин // Электроника. – Фрязино. 2011. –№ 7. – С. 86–87.
45. Еремка В.Д., Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью / В.Д. Еремка, В.А. Кабанов, Ю.Ф. Логвинов, И.М. Мыценко, А.Н. Роечко; Под ред. В.Б. Разказовского. – Севастополь: Вебер, 2013. – 217с.
46. Преображенский А.П. Методы прогнозирования характеристик рассеяния электромагнитных волн / А.П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2014. – № 1 (4). – С. 3.
47. Преображенский А.П. Проблемы оптимизации дифракционных характеристик технических объектов / А.П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 9.

48. Васильева К.С. О моделировании распространения сигналов в беспроводных системах связи / К.С. Васильева // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – №5. –С. 34-35.
49. Демидчик В.И. Электродинамика СВЧ / В.И. Демидчик. –Мн.: Университетское, 1992. – 255с.
50. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн/ Б.М. Петров. – М.: Телеком, 2003. – 558с.
51. Взятых В.Ф. Объемные СВЧ резонаторы: принципы, конструкции и свойства, перспективы и проблемы / В. Ф. Взятых, М. Е. Ильченко // Межведомственный тематический сборник. – М.: МЭИ. – 1983. – №19. –С. 5-19.
52. Коробкин В.А. Повышение собственной добротности волноводно-диэлектрических резонаторов на прямоугольных волноводах / В. А. Коробкин, В. Я. Дваденко, В. Н. Великоцкий и др. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1982. – вып. 8. – С. 26-28.
53. Ильченко М. Е. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятых, Л. Г. Гассанов и др.; под ред. М.Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
54. Ильченко М. Е. Электродинамика диэлектрических резонаторов / М. Е. Ильченко, А. А. Трубин. – К.: Наукова думка, 2004. – 265 с.
55. Ильченко М. Е. Теория диэлектрических резонаторов / М. Е. Ильченко, А. А. Трубин. – К.: Либідь, 1993. – 216 с.
56. Трубин А.А. Многоэлементные антенны на параболических решетках диэлектрических резонаторов / А.А. Трубин // Вісник Національного технічного університету України «КПІ» Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2015. — №60. –С. 58-68.
57. Ueda T. Dielectric-Resonator-Based Composite Right/Left-Handed Transmission Lines and Their Application to Leaky Wave Antenna / T. Ueda, N.

- Michishita, M. Akiyama, T. Itoh // IEEE Trans. on MTT. – 2008. – V. 56, №10. – P. 2259-2269.
- 58.Булгаков Б.М. Исследование многозеркальных открытых резонаторов с эшелеттом / Б.М. Булгаков, А.И. Фисун, А.М. Фурсов // 3-й Всесоюзный симпозиум по миллиметровым и субмиллиметровым волнам, 22-24 сентября 1980 г.: мат. конф. – Горький –1980. – С. 117-118.
- 59.Фисун А. И. Возбуждение колебаний в открытых резонаторах с эшелеттными и уголково эшелеттными зеркалами / А. И. Фисун, В. И. Ткаченко, О. И. Белоус, А. А. Кириленко // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 5. – С. 632–639.
- 60.Копосова Е. В. Эшелетт для волн е-поляризации - ступенчатые поверхности с прямоугольной канавкой на ступеньке / Е. В. Копосова // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, № 2. – С. 163-173.
- 61.Белоус О.И. Многозеркальный открытый резонатор с эшелеттным зеркалом / О.И. Белоус, В.Г. Дудка, В.К. Корнеев, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун // Журнал Нано - та Електронної Фізики. – 2012. –Т.4, №4. – С.42-45.
- 62.Белоус О.И. Квазиоптический твердотельный источник излучения миллиметрового диапазона с повышенной долговременной стабильностью частоты / О.И. Белоус, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 15^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2005), 12-16 сентября 2005 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2005. – Т. 1. – С. 152-153.
- 63.Белоус О.И. Энергетические и спектральные характеристики квазиоптических твердотельных генераторов миллиметрового диапазона длин волн / О.И. Белоус, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун// Радиофизика и электроника. – 2007. – Т. 12, №1. – С. 236-242.
64. Архипов А.В. Квазиоптическая резонансная система для твердотельного генератора / А.В. Архипов, О.И. Белоус, И.К. Кузьмичев, А.С. Тищенко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №2. – С. 166-171.

65. Белоус О.И. Квазиоптические резонансные системы в приборах твердотельной электроники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн / О.И. Белоус, А.А. Кириленко, А.И. Фисун // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 13, спец. вып. – С. 377-390.
66. Архипова Е.А. КВЧ диэлектрометрия сильнопоглощающих сред. Источник излучения, область взаимодействия. / Е.А. Архипова, П.С. Красов, А.И. Фисун // Журнал Нано - та Електронної Фізики. – 2010. – Т.2, №1. – С.33-41.
67. Бородкина А.Н. СВЧ исследование биологических жидкостей для диагностики и лечения гипертонических состояний / А.Н. Бородкина, Н.И. Слипченко // Радиотехника. – 2014. – № 4. – С. 3-7.
68. Кириченко А.Я. Квазиоптические твердотельные резонаторы / А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Н.Т. Черпак. Киев: Наукова думка, 2008. – 296с.
69. Кириченко А.Я. Высшие азимутальные электромагнитные колебания НЕ- и ЕН-типов в составном дисковом диэлектрическом резонаторе / А.Я. Кириченко, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский // Радиофизика и электроника. – 2007. – Т.12, №3. – С. 465-470.
70. Белоус О.И. Азимутальные колебания в квазиоптическом диэлектрическом резонаторе с дифракционной решеткой / О.И. Белоус, В.Л. Пазынин, О.Н. Сухоручко, А.И. Фисун // Радиофизика и электроника. – 2012. – Т.17, №4. – С. 29-38.
71. Кириченко А.Я. Высшие азимутальные электромагнитные колебания НЕ- и ЕН-типов в дисковом диэлектрическом резонаторе / А.Я. Кириченко, С.П. Мартынюк, А.П. Моторненко, И.Г. Скуратовский // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2008. – №8. – С. 75-81.
72. Егоров В. Н. Азимутальные колебания в анизотропном диэлектрическом резонаторе / В. Н. Егоров, И. Н. Мальцева // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1984. – вып.2. – С. 36-39.

- 73.Виноградов А.В. Волны шепчущей галереи / А.В. Виноградов, А.Н. Ораевский // Соросовский образовательный журнал. – 2001. –Т.7, №2. – С.96-102.
- 74.Guillon P. Whispering-gallery modes herald DR MM-wave use / P. Guillon, X. H. Jiao, P. Auxemery, L. A. Bermudez // Microwave and Radio frequency. – 1987. – Vol. 26, № 9. – P. 85-96.
- 75.Jiao X. H. Whispering-gallery mode of dielectric structures: application to millimeter wave band stop filters / X. H. Jiao, P. Guillon, L. A. Bermudez, P. Auxemery // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 1987. – Vol. MTT-35, № 12. – P. 1169-1175.
- 76.Cros D. Whispering gallery dielectric resonator modes for W-bend devices / D. Cros, P. Guillon // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – Vol. MTT-38, № 11. – P. 1667-1674.
- 77.Annino G. Whispering gallery modes in dielectric resonator: characterization at millimeter wavelength / G. Annino, M. Cassettari, I. Longo, M. Martinelli // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. – 1997. – Vol. MTT-45, № 11. – P. 2025-2034.
- 78.Когут А.Е. Колебания типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, Ю.Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1997. – Т. 40, № 2. – С. 19-26.
- 79.Когут А.Е. О возможности разрежения спектра вынужденных колебаний типа шепчущей галереи в цилиндрических диэлектрических резонаторах / А. Е. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник, С.Н. Харьковский // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники. – Харьков, 2001. – Т. 6, № 2-3. – С. 218-221.
- 80.Иванов Е.Н. Приближенный расчет характеристик азимутальных колебаний дисковых диэлектрических резонаторов / Е.Н. Иванов, В.И. Калиничев// Радиотехника. – 1988. – Т.30, №4. –С.86-89.

81. Добромыслов В.С. Расчет лейкосапфировых резонаторов с азимутальными колебаниями / В.С. Добромыслов, А.П. Кузнецов // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1987. – №6 (400). – С. 21-23.
82. Gillon P. Accurate resonant frequencies of dielectric resonator / P. Gillon, Y. Garaeult // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. – 1977. – V.25, № 11. – P. 916-922.
83. Itoh T. New method for computing the resonant frequencies of dielectric resonator / T. Itoh, R. Rudokas // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. – 1977. – V.25, № 1. – P. 52-54.
84. Lee J. A new method of accurately determining resonant frequencies of cylindrical and ring dielectric resonators / J. Lee, Y.S. Kin // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. – 1999. – V.47, № 6. – P. 706-708.
85. Кузнецов В.А. Резонансные частоты дисковых диэлектрических резонаторов / В.А. Кузнецов, А.М. Лерер, В.С. Михалевский // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т.29, № 11. – С. 2124-2128.
86. Кириченко А.Я. Аксиально-однородные азимутальные колебания в анизотропных диэлектрических резонаторах / А.Я. Кириченко, Ю.В. Прокопенко, Н.Т. Черпак // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т.34, № 2. – С. 300-304.
87. Филиппов Ю.Ф. Спектр резонансных колебаний неоднородного дискового диэлектрического резонатора / Ю.Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1990. – Т.33, № 11. – С. 1304-1308.
88. Gastine N. Electromagnetic resonance of free dielectric sphere / N. Gastine, L. Courtois, I. L. Dorman // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1967. – Vol. MTT-27, № 10. – P. 1299-1305.
89. Kharkovsky S. Whispering gallery modes of an open hemispherical image dielectric resonator / S. Kharkovsky, Y. Filipov, Z. Eremenko // Microwave and Optical Technology Letters. – 1999. – Vol. 21, №4. – P. 252-257.

90. Филиппов Ю. Ф. Резонансные частоты азимутально-однородных колебаний анизотропного шара / Ю.Ф. Филиппов, З.Е. Еременко // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 5. – С. 81-85.
91. Прокопенко Ю.В. Собственные колебания анизотропного диэлектрического шара / Ю.В. Прокопенко, Т.А. Смирнова, Ю. Ф. Филиппов // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74, вып. 4. – С. 82-88.
92. Когут А.Е. Колебания типа шепчущей галереи открытых квазиоптических металлодиэлектрических резонаторов, возбуждаемые сосредоточенными источниками излучения: дис. кандидата физ.-мат. наук: 01.04.03 / Когут Александр Евгеньевич. – Х., 1998. – 150 с.
93. Взятых В.Ф. Физические явления в цилиндрическом металлодиэлектрическом резонаторе и проблемы проектирования экранированных диэлектрических резонаторов / В.И. Калинин, В.И. Куимов // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т.30, №4. – С. 705-712.
94. Харьковский С.Н. Фокусировка волн типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе / С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.А. Солодовник // Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, вып. 18. – С. 38-42.
95. Харьковский С.Н. Преобразование мод шепчущей галереи в диэлектрическом шаре, возбуждаемом диэлектрическим волноводом / С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т.22, вып. 20. – С.34-37.
96. Когут А.Е. Колебания типа шепчущей галереи в квазиоптическом полусферическом диэлектрическом резонаторе / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, Ю. Ф. Филиппов, С.Н. Харьковский // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1997. – Т. 40, № 1. – С. 19-26.
97. Харьковский С.Н. Возбуждение колебаний типа шепчущей галереи в квазиоптических металло-диэлектрических резонаторах через щель связи в зеркале / С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов // Радиофизика и

- электроника: Сб. науч. тр. – Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1997. – Т.2, №1. –С. 31-34.
- 98.Kogut A.E. Effect of the ellipticity of a dielectric resonator on the induced whispering gallery modes / A.E. Kogut // Technical Physics Letters. – 2002. – V.28, №12 – P. 1007-1010.
- 99.Кириченко А.Я. Особенности характеристик колебаний типа шепчущей галереи в эллипсоидальном диэлектрическом резонаторе с малым эксцентриситетом / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2003. – Т. XLVI, № 4. – С.314-321.
100. Когут А.Е. Моды шепчущей галереи в эллипсоидальном диэлектрическом резонаторе миллиметрового диапазона с малым эксцентриситетом / А.Е. Когут, З.Е. Еременко, Ю.Ф. Филиппов, В.В. Кутузов // ЖТФ. – 2004. –Т.74, вып.4. –С. 94-97.
101. Kharkovsky A. Solid-state oscillators with whispering-gallery-mode dielectric resonators / S. Kharkovsky, A. Kirichenko, A. Kogut // Microwave and Optical Technology Lett..– 1996. – Vol. 12, № 4. – P. 210-213.
102. Харьковский С. Н. Твердотельные генераторы КВЧ с квазиоптическими металлодиэлектрическими резонаторами / С. Н. Харьковский, А. Е. Когут, П. В. Громов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 7^{ая} Международная Крымская конференция (КрыМиКо'97), 15-18 сентября 1997 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 1997. – Т.1. – С. 361-362.
103. Когут А.Е. Индивидуальная настройка диодов в генераторе КВЧ с открытым квазиоптическим металлодиэлектрическим резонатором / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, С.Н. Харьковский // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 8^{ая}Международная Крымская конференция (КрыМиКо'98), 14-17 сентября 1998 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 1998. – Т.1. –С. 160-161.

104. Кириченко А.Я. Автодинный метод исследования диэлектрических свойств жидкостей в 8-мм диапазоне длин волн / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 14^{ая} Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2004), 13-17 сентября 2004 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2004. – С.646-647.
105. Кириченко А.Я. Генератор Ганна на основе бочкообразного диэлектрического резонатора для измерения диэлектрических характеристик жидкостей / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут, В.В. Кутузов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 15^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2005), 12-16 сентября 2005 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2005. – Т. 2. – С. 840-841.
106. Кириченко А.Я. Генератор Ганна для измерения электрических характеристик жидкостей, стабилизированный диэлектрическим резонатором / А.Я. Кириченко, А.Е. Когут // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т.12, №2. – С.57-59.
107. Когут А.Е. Вынужденные колебания шепчущей галереи в диэлектрических резонаторах миллиметрового диапазона длин волн: дисс. доктора физ.-мат. наук:01.04.03 / Когут Александр Евгеньевич. –Х., 2011. – 343 с.
108. Каток В. Б. Фильтры на основе диэлектрических резонаторов бегущей волны / В. Б. Каток, А.А. Манько // Радиотехника. – 1995. – №1-2. – С. 24-26.
109. Трубин А. А. Полосовые фильтры с подсистемами связанных диэлектрических резонаторов / А.А. Трубин // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1999. – Т. 42, № 5. – С. 78-80.
110. Трубин А. А. Рассеяние микроволновых пакетов на диэлектрических фильтрах/ А. А. Трубин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 15^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2005),

- 12-16 сентября 2005 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2005. – Т.1. – С. 511-512.
111. Guillon P. Whispering-gallery modes herald DR MM-wave use / P. Guillon, X. H. Jiao, P. Auxemery, L. A. Bermudez // *Microwave and Radiofrequency*. – 1987. – Vol. 26, № 9. – P. 85-96.
112. Jiao X. H. Whispering-gallery mode of dielectric structures: application to millimeter wave band stop filters / X. H. Jiao, P. Guillon, L. A. Bermudez, P. Auxemery // *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. – 1987. – Vol. MTT-35, № 12. – P. 1169-1175.
113. Кириченко А. Я. Неоднородные открытые диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями для исследования и неразрушающего контроля материалов / А. Я. Кириченко, В. А. Солодовник, Ю. Ф. Филиппов, С. Н. Харьковский // *Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т радиофизики и электроники*. – Харьков, 1990. – С. 69-75.
114. Добромислов В.С. Диэлектрические резонаторы для измерения параметров высококачественных диэлектриков / В.С. Добромислов// *Труды МЭИ. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры*. – 1978. – вып. 360. – С. 26-30.
115. Костромин В. В. Исследование диэлектрических свойств неполярных полимеров в диапазоне частот 16-38 ГГц в интервале температур 4,2-300 К / В. В. Костромин, Е. В. Быков, Д. Я. Гальперович // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. – 1984. – №4. – С. 52-55.
116. Kirichenko A. Dielectric half-disk resonator with whispering-gallery modes for measurements of the electric properties of water / A. Kirichenko, A. Kogut // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2008. – V. 51, V9. –P. 695-701

117. Krupka J. Use of whispering gallery modes for complex permittivity of ultra-low-loss dielectric materials / J. Krupka, K. Derzakou'sky, A. Abramowicz // IEEE Trans. on MTT. – 1999. – V. 47, №6. – P. 752-759.
118. Баранник А.А., Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Черпак Н.Т. Квазиоптический диэлектрический резонатор. Измерение микроволновых характеристик диэлектриков и полупроводников // Радиофизика и электроника. – 2000. – Т.5, №3. – С. 104-109.
119. Прокопенко Ю.В. Широкополосный резонансный метод определения диэлектрических свойств веществ с большими потерями / Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Филиппов, Г.А. Чуканова и др. // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. –Т.4, №2. – С. 201-205.
120. Бараник О.А. Електромагнітні мікрохвилі шепочучої галереї в рідинах / О.А. Бараник, Ю.В. Прокопенко, Ю.Ф. Філіпов, М.Т. Черпак // Доп. НАН України. – 2003. – №3. – С. 77-79.
121. Еременко З.Е. Объемный полусферический резонатор для измерения диэлектрической проницаемости в малом объеме сильнопоглощающей жидкости / З.Е. Еременко, Е.М. Ганапольский // Радиофизика и электроника. – 2003. –Т.8, №2. – С. 187-196.
122. Еременко З.Е. Квазиоптический слоистый шаровой резонатор для измерения диэлектрической проницаемости сильнопоглощающей жидкости в миллиметровом диапазоне / З.Е. Еременко // Радиофизика и электроника. – 2004. –Т.9, №2. –С. 442-451.
123. Eremenko Z.E. Exact-calculated resonator method for permittivity measurement of high loss liquids at millimeter wavelength / Z.E. Eremenko, E.M. Ganapolskii, V.V. Vasilchenko// Measurement science and technology. – 2005. –V.16. – P. 1619-1627.
124. Kirichenko A.Ya. Determination of the complex dielectric permittivity of ice in the millimeter-wave range by the resonator method / A.Ya. Kirichenko, A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, V.A. Solodovnik // Ukr. J. Phys. – 2007. – V. 52, №5. – P. 511-514.

125. Бажилов В.А. Расчет и исследование цилиндрических экранированных СВЧ и КВЧ колебательных систем на основе диэлектрических резонаторов: автореф. дисс. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: спец. 05.12.07 „Антенны, СВЧ устройства и их технологии” / В.А. Бажилов. – Нижний Новгород, 2007. – 20с.
126. Гуреев А.В. Разработка математических моделей и оценка показателей качества передачи информации в беспроводных сетях: автореф. дисс. на соискание уч. степ. докт. техн. наук: спец. 05.12.13 „Системы, сети и устройства телекоммуникаций” / А.В. Гуреев – Москва, 2003. – 28с.
127. Гуреев А.В. Расчет добротности экранированных резонаторов СВЧ / А.В. Гуреев // "Электронная техника". Сер. 10. "Микроэлектронные устройства". – 1984. – № 4. – С. 13-17.
128. Гуреев А.В. Метод учета потерь в металле при анализе экранированных резонаторов и волноводов / А.В. Гуреев // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т.30, № 6 – С. 1058-1062.
129. Kharkovsky S.N. Shielding of the dielectric ball resonators with whispering gallery modes / S.N. Kharkovsky, Yu.F. Filipov, Z.E. Eremenko et al // 14 In. Symp. and Exhib. on Electromagnetic Compatibility. – Wroclaw – 1998. Symp. Proceed. – P. 380-384.
130. Харьковский С.Н. Высокодобротные колебания шепчущей галереи в экранированном сферическом диэлектрическом резонаторе / С.Н. Харьковский, Ю.Ф. Филиппов, А.Е. Когут и др. // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, №14. – С.20-25.
131. Kharkovsky S.N. Whispering-gallery modes in shielded hemispherical dielectric resonators / S.N. Kharkovsky, Yu.F. Filippov, A.E. Kogut et al. // IEEE Trans on MTT. – 2002. – V. 50, – P. 2647 – 2649.
132. Когут А.Е. Вынужденные колебания типа шепчущей галереи в частично экранированном полусферическом диэлектрическом резонаторе / А.Е. Когут, В.В. Кутузов, В.А. Солодовник, С.Н. Харьковский // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т.27, вып.22. – С.19-23.

133. Когут А.Е. О радиальном распределении энергии колебаний в экранированном слоистом полусферическом резонаторе / резонаторе / А.Е. Когут, Ю.Ф. Филиппов, В.В. Кутузов и др. // Радиофизика и Электроника: Сб. науч. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков. – 1999. – Т.4, №3. – С. 90-95.
134. Харьковский С.Н. Возбуждение лучевых колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах с модами шепчущей галереи / С.Н. Харьковский, А.Е. Когут, В.В. Кутузов, // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т.23, вып. 15. – С. 25-29.
135. Когут А.Е., Филиппов Ю.Ф., Кутузов В.В. и др. О резонансных колебаниях в экранированном полусферическом диэлектрическом резонаторе / А.Е. Когут, Ю.Ф. Филиппов, В.В. Кутузов и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии 10^я Международная Крымская конференция (КрыМиКо'2000), 11-15 сентября 2000 г.: мат. конф. – Севастополь, Крым, Украина – 2000. – Т.1. – С. 382-383.
136. Ганапольский Е.М. О природе квантового хаоса в рассеивающей бильярдной К-системе / Е.М. Ганапольский// Доклады НАН Украины. – 2012. – № 3. – С. 85-91.
137. Krupka J. Dielectric properties of single crystals of Al_2O_3 , LaAlO_3 , NdGaO_3 , SrNiO_3 and MgO at cryogenic temperatures / J. Krupka, R. Geyer, M. Kuhn, J. Hinken // IEEE Trans. on MTT. – 1994. – V. 42, №12. –P. 1886-1889.
138. Jacob M.V. Temperature dependence of permittivity and loss tangent of lithium tantalite at microwave frequencies / Jacob M.V., Hartnett J.G., J. Mazierska et al. // IEEE Trans. on MTT. – 2004. – V. 52, №2. –P. 536-541.
139. Giordano V. Whispering-gallery mode technique applied to the measurement of langasite between 4K and 300K / V. Giordano, J.G. Hartnett, J. Krupka et al. // IEEE Trans. on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2004. – V.51, №5. –P. 484-490.
140. Панов В.И. Стабилизация частоты генератора высокочастотными диэлектрическими резонаторами из лейкосапфира / В.И. Панов, П.Р. Станков // Радиотехника и электроника. – 1986. –Т.31, №1. –С.213-215.

141. Иванов Е.Н. Повышение эффективности возбуждения дисковых диэлектрических резонаторов / Е.Н. Иванов, А.А. Карачев, Д.П. Царапкин // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1987. – Т.30, №10. – С. 68-69.
142. Kogut A.E. Excitation of whispering-gallery type oscillations in quasi-optical metal-dielectric resonator by a coupling slot in the mirror / A.E. Kogut, V.V. Kutuzov, A.A. Kharkovskaya, S.N. Kharkovsky // Telecommunication and Radio Engineering. – 1999. – V.53, №11. – P. 42-47.
143. Голубничая Г.В. Возбуждение Н-мод полусферического диэлектрического резонатора емкостной щелью в металлическом зеркале / Г.В. Голубничая, А.Я. Кириченко, А.Е. Когут и др. // Доклады НАН Украины. – 2004. – №11. – С.80-84.
144. Когут А.Е. О возбуждении колебаний шепчущей галереи в полудисковом диэлектрическом резонаторе щелью связи в зеркале / А.Е. Когут, О.А. Матяш // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2006. – Т.49, №2. – С.10-16.
145. Когут А.Е. Влияние условий и способов возбуждения полудискового диэлектрического резонатора на характеристики колебаний шепчущей галереи / А.Е. Когут // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2007. – Т.50, №5. – С.22-30.
146. Взятых В.Ф. Собственные и вынужденные колебания открытых резонансных систем на базе дисковых диэлектрических резонаторов / В. Ф. Взятых, В. И. Калиничев // Известия вузов. Радиофизика. – 1983. – Т. 26, № 4. – С. 475-482.
147. Вятчанин С.П. Перестраиваемые узкополосные оптические фильтры с модами типа шепчущей галереи / С.П. Вятчанин, М.Л. Городецкий, Ильченко В.С. // Журн. прикл. спектроскопии. – 1992. – Т.56, №2. – С.274-280.
148. Кириченко А.Я. Возбуждение колебаний шепчущей галереи в шаре, расположенном в поле волноводного излучателя / А.Я. Кириченко, А.Е.

- Когут // Радиофизика и Электроника: Сб. науч. тр. ИРЭ НАН Украины. – Харьков, 2008. – Т.13, №2. – С.159-165.
149. Eremenko Z.E. Method of microwave measurement of dielectric permittivity in small volume of high loss liquid using hemispherical cavity resonator / Z.E. Eremenko, E.M. Ganapolskii // Measurement Science and Technology. – 2003. – V. 14, № 12. – P. 2096 - 2103.
 150. Kogut A.E., Kharkovsky S.N., Kutuzov V.V., Solodovnik V.A. Excitation of the whispering gallery modes at the shielded hemispherical dielectric resonator // Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves: 3International. Kharkov Symposium, (MSMW'1998), September 15-17, 1998: Symp. Proc. – Kharkov, Ukraine, 1998 – V.2. – P.669-670.
 151. Скрипка С.Л. Планарные структуры волноводной элементной базы миллиметрового диапазона / С.Л. Скрипка, В.В. Данилов, И.С. Павловский // Радиофизика и электроника. – 2011. –Т. 2(16), №4. –С. 96-102.
 152. Минкара С.М. Многомодовые прямоугольные диэлектрические волноводы и резонаторы КВЧ диапазона// дисс. канд. техн. наук: 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. / Минкара Саадалла Мохамад – НИУ МЭИ, 2015. – 154с.
 153. Дробахин О.О. Техника и полупроводниковая электроника СВЧ: Учебное пособие / О.О. Дробахин, С.В. Плаксин, В.Д. Рябчий, Д.Ю. Салтыков. – Севастополь: Вебер, 2013. – 322с.
 154. Архипова Е.А. Исследование адренореактивности эритроцитов человека методом одночастотной диэлектрометрии в миллиметровой области радиоволн / Е.А. Архипова, В.С. Личко, А.И. Фисун и др. // Актуальные проблемы неврологии и нейрореабилитации. Сборник научных работ, посвященный 30-летию кафедры лечебной физкультуры, спортивной медицины и реабилитации ХМАПО. – Харьков. – 2012. – С. 86-96.
 155. Красов П. С. Волноводная диэлектрометрия биологических объектов в области частотной дисперсии свободной воды: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук : спец. 01.04.01 „Физика приборов,

- элементов и систем” / Красов Павел Сергеевич; Харьк. национ. ун-т радиоэлектроники. — Харьков, 2011. — 20 с.
156. Пристрій для опромінювання біологічних рідин електромагнітними хвилями міліметрового діапазону : патент на винахід № 90704 Україна, клас патенту H0P7/00, A61K41/00 / Білоус О. І., Малахов В. А., Носатов А. В., Сіренко С. П., Фісун А. І.; власник — Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України. — № а2007 10113; заяв. 10.09.2007; публ. 10.03.2009, Бюл. № 5.
 157. Бареева Р.С. КВЧ-диэлектрометрия мочи в прогнозе ее агрегативной устойчивости / Р.С. Бареева, И.И. Турковский, Н.М. Молодкина и др.// Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. — 2008. — №4. — С.411-413.
 158. Еременко З.Е. Объемный полусферический резонатор для измерения диэлектрической проницаемости в малом объеме сильно поглощающей жидкости / З.Е. Еременко, Е.М. Ганапольский // Радиофизика и электроника: Сборник научных трудов / НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. — Харьков. — 2003. — Т.8, № 2. — С.187 - 196.
 159. Eremenko Z.E. Method of microwave measurement of dielectric permittivity in small volume of high loss liquid using hemispherical cavity resonator / Z.E. Eremenko, E.M. Ganapolskii // Measurement Science and Technology. — 2003. — V. 14, № 12. — P. 2096 - 2103.
 160. Eremenko Z. High loss liquids permittivity measurement using millimeter wave differential dielectrometer / Z. Eremenko// Microwave Conference (EuMC), 2010 European. Conf. Proceed. — P. 1532-1535.
 161. Кириченко А. Я. Полудисковый диэлектрический резонатор с колебаниями шепчущей галереи для измерения электрических свойств воды / А. Я. Кириченко, А. Е. Когут // Известия вузов. Радиофизика. — 2008. — Т. LI, № 9. — С. 22-30.

162. Кузьмичев И.К. Экспериментальное обнаружение колебаний типа "шепчущая галерея" в открытом резонаторе / И.К. Кузьмичев // Доповіді НАН України. – 1999. – № 7. – С. 75-78.
163. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов / Я.Ю. Ахадов. – М.: Наука, 1977. – 400с.