

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи
УДК 537.874:621.372.8

ЦАКАНЯН Ирина Семеновна

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МНОГОМОДОВЫХ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ
В ВОЛНОВОДАХ

(01.04.03 - радиофизика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1993



046-26.77

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени
Институте радиофизики и электроники АН Украины

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор
КИРИЛЕНКО Анатолий Афанасьевич

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
профессор
КАЗАНСКИЙ Вадим Борисович
(Харьковский государственный
университет)

- доктор физико-математических наук,
СИРЕНКО Юрий Константинович
(ИРЭ АН Украины)

Ведущая организация - Киевский политехнический институт

Защита состоится "16" марта 1993 г. в 15⁰⁰ час.
на заседании специализированного совета Д 016.64.01 при
ИРЭ АН Украины (310085, Харьков-85, ул. Академика Проскуры, 12).

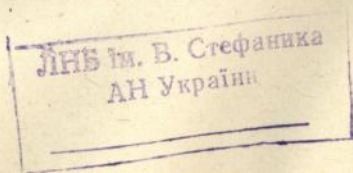
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ АН
Украины.

Автореферат разослан

"15" февраля 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук

К. А. ЛУКИН



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Многослойные и скачкообразные металлодиэлектрические структуры конечной протяженности в регулярных волноводах являются важной составной частью элементной базы диапазонов СВЧ и КВЧ и находят самые разнообразные применения в твердотельной и вакуумной электронике, антенно-волноводной и измерительной технике.

Традиционно эти структуры используются в одномодовом режиме работы. В электронных приборах О-типа они возбуждаются, чаще всего, E_{01} волной круглого волновода. В устройствах, реализованных в коаксиальном исполнении или на базе прямоугольного волновода - соответственно TEM - и H_{10} -волнами этих трактов. Недостаточная точность расчета известными приближенными методами, как правило, приводит к тому, что проектирование устройств на их основе носит эмпирический, часто интуитивный характер, а отработка сопряжена с большими трудностями. Кроме того, существует опасность разрушения характеристик устройств из-за возбуждения колебаний высших волн, не учитываемых приближенными моделями. Для отдельных элементов этих структур известны также и строгие решения задач дифракции, но конкретные физические результаты в большинстве случаев получены в ограниченной области значений параметров без учета диэлектрических потерь и полный электродинамический анализ их отсутствует.

Все это приводит к необходимости разработки адекватных электродинамических моделей, глубокого и всестороннего анализа их свойств, поиска новых физических принципов конструирования. Особенно актуальны задачи расширения функциональных возможностей конструктивно простых базовых элементов и узлов для реализации оптимальных технических решений устройств с улучшенными выходными характеристиками.

В этой связи значительный интерес представляет изучение фундаментальных свойств практически важных металлодиэлектрических структур (рис. 1). В силу резонансной природы самых разнообразных явлений, свойственных этим открытым структурам в многомодовом режиме работы, они способны концентрировать энергию электромагнитного поля в малом объеме и в непосредственной близости от границ с регулярным волноводом. Поэтому сложные структуры естественно рассматривать как параллельное (рис. 1. а, д) и последовательное (рис. 1. б, е, к) включение волноводно-диэлектрических резонаторов (ВДР) (рис. 1. в, г, ж, з, и, л, м) с потерями на излучение в подводящие тракты и на поглощение в диэлектрике. Здесь помимо чисто физических аспектов, касающихся "взаимодействия" элементов интегральной структуры (ИС) между собой и ее связи

как целого с линией передачи, интересна и практическая сторона вопроса. В частности - особенности построения многозвенных устройств, способы управления их характеристиками, возможность практического использования новых эффектов, свойственных таким структурам.

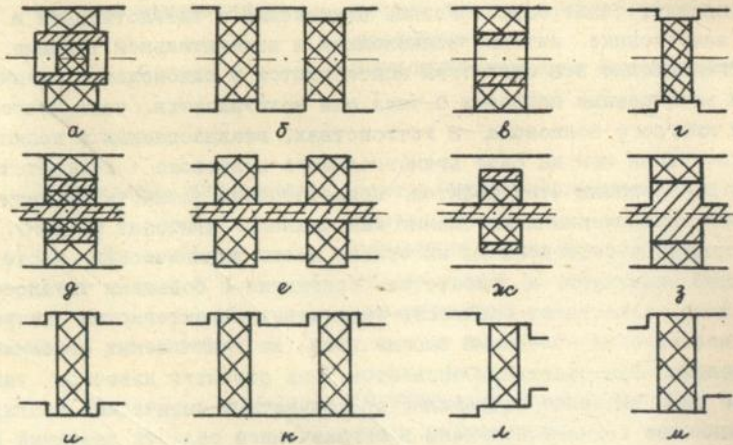


Рис. 1. Металлодиэлектрические структуры в круглом (а-г), коаксиальном (д-з) и прямоугольном (и-л) волноводах

Наиболее плодотворным методом анализа открытых электродинамических структур является строгое моделирование и совместное изучение спектральных и дифракционных характеристик, что обеспечивает полноту и достоверность исследований. Это важно, поскольку без ясного осознания физических процессов, определяющих те или иные свойства каждого элемента и узла, поиск и реализация оптимальных решений конкретных устройств становятся проблематичными.

Цель работы:

- разработка математических моделей и реализация алгоритмов строгого расчета спектральных и дифракционных характеристик металлодиэлектрических структур, сочетающих полноту и достоверность анализа резонансных свойств с возможностью параметрического синтеза и оптимизации реальных устройств;

- изучение природы резонансного прохождения, отражения и поглощения волн в структурах, образованных параллельным и последовательным включением в регулярные круглый, коаксиальный и прямоугольный волноводы многомодовых металлодиэлектрических неоднородностей;

- исследование возможности использования изученных структур для построения частотно-селективных устройств режекторного, пропускающего и поглощающего типа, а также их дальнейшей интеграции с активными элементами и приборами твердотельной и вакуумной электроники диапазонов С(К)ВЧ.

Метод исследования. Соизмеримость характерных размеров структур с длиной волны, их конфигурационная сложность и конечная толщина металлических поверхностей предопределяют выбор методов решения спектральных и дифракционных краевых задач. Принцип декомпозиции и метод частичных областей позволяют переформулировать их к матричным уравнениям второго рода, допускающим решение методом редукции с заданной точностью в широком диапазоне изменения частотного, геометрических и материальных параметров.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней впервые на основе строгого моделирования осуществлен достаточно полный электродинамический анализ практически важных металлодиэлектрических волноводных структур. Установлены закономерности формирования их резонансных свойств в многомодовом режиме работы. Выявлена связь этих свойств со взаимодействием возбуждаемых "собственных" колебаний.

1. Исследованы электродинамические свойства односвязных и двухсвязных ВДР в круглом и коаксиальном волноводах:

- выявлены общие закономерности и особенности возникновения эффектов резонансного прохождения и отражения волн;
- найдены условия резонансного поглощения в ВДР.

2. В интегральных структурах из параллельно включенных ВДР обнаружены и изучены:

- особенности проявления эффектов нежесткой связи колебаний;
- эффект резонансного поглощения, близкого к полному.

3. В интегральных структурах из последовательно включенных ВДР:

- установлена связь между резонансными свойствами и спектром собственных частот;
- обнаружен и изучен эффект резонансного поглощения.

Практическая ценность работы заключается в разработке и программной реализации пакета математических моделей для полного электродинамического анализа, параметрического синтеза и оптимизации металлодиэлектрических структур. Достоинством пакета является возможность расчета не только исследованных в диссертации структур, но и ступенчатых переходов, радиальных и проходных резонаторов, опорных элементов, выводов энергии, отрезков замедляющих систем, различных сочетаний этих узлов и т. д.

Выработаны конкретные рекомендации по построению в резонансной области частот конструктивно простых, средне- и широкополосных режекторных и пропускающих фильтров, узкополосных поглощающих фильтров на многомодовых ВДР и ИС в круглом и коаксиальном волноводах.

Рассчитаны коаксиальные многосвязные частотно-селективные устройства с расширенными функциональными возможностями, улучшающие характеристики усилителей СВЧ и смесителей КВЧ, функциональные узлы электронных приборов О-типа на кольцевых и дисковых ВДР и ИС в круглом волноводе.

Разработана колебательная система параметрического усилителя и преобразователя КВЧ на сверхразмерных Н-плоскостных расширениях прямоугольного волновода.

Обоснованность и достоверность результатов работы определяется строгой постановкой краевых задач, использованием хорошо апробированных методов их решения и подтверждается соответствием ряда численных результатов данным как проведенных, так и описанных в литературе экспериментальных исследований.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях "Проектирование радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах" (Тбилиси, 1988), "Современные проблемы радиоэлектроники" (Москва, 1988), "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем СВЧ на ОИС" (Суздаль, 1989), "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (Новосибирск, 1990), на X Всесоюзном семинаре "Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа", 1 Украинском симпозиуме по физике и технике мм и субмм волн" (Харьков, 1991). По материалам диссертации опубликовано 12 работ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 120 страниц основного текста, 46 страниц рисунков и таблиц, список литературы на 12 страницах из 117 наименований, включая публикации автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проанализировано современное состояние вопроса, обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель, описаны основные этапы работы, выделены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе излагаются основные моменты построения математических моделей для полного электродинамического анализа многослойных и скачкообразных металлodieлектрических структур конечной

протяженности, возбуждаемых азимутально-однородными электрическими волнами круглого и коаксиального (рис. 1. а-з) волноводов и H_{00} -волнами прямоугольного волновода (рис. 1. и-м). Металлические поверхности предполагаются идеально проводящими. Комплексная диэлектрическая проницаемость материала включений или заполнения введена как $\epsilon = \text{Re} \epsilon (1 + i \text{tg} \delta)$.

При построении моделей использовался декомпозиционный подход. В строгой постановке решены ключевые задачи: о коаксиальном разветвлении круглого и коаксиального волноводов; о сочленении круглого и коаксиального волноводов; о скачках поперечного сечения круглого, коаксиального и прямоугольного волноводов; о плоско-поперечных границах раздела сред в этих трактах. Методом частичных областей задачи сводятся к матричным уравнениям второго рода, решаемым методом редукции. Алгоритмы расчета матриц рассеяния ключевых задач реализованы в виде автономных процедур. Реконструкция исходных структур осуществляется методом обобщенных матриц рассеяния. Процедура реконструкции включает восстановление полей дифракции. Время расчета на ЭВМ БЭСМ-6 матрицы рассеяния ключевых задач с точностью до 1% составляет менее 2 с в прямоугольном и 5 с в круглом и коаксиальном волноводах. Для структуры, объединяющей четыре неоднородности, оно возрастает примерно вдвое.

Спектральная задача ставится относительно частотного параметра $\mathfrak{z} = R\omega / 2\pi c$, где R - характерный поперечный размер, например, радиус круглого волновода, ω - круговая частота, c - скорость света. Задача состоит в определении множества значений \mathfrak{z} , образующего спектр свободных колебаний, в точках которого однородное уравнение Гельмгольца имеет нетривиальные решения во всем объеме структуры, включая полубесконечные волноводы. Собственные частоты ищутся на комплексной плоскости $\tilde{\mathfrak{z}} = \text{Re} \tilde{\mathfrak{z}} - i \text{Im} \tilde{\mathfrak{z}}$ с разрезами, выходящими из частот отсечки регулярного тракта, в область значений $7\pi/4 < \arg \tilde{\mathfrak{z}} < 2\pi$, что соответствует колебаниям, затухающим во времени. Методами декомпозиции и частичных областей спектральная задача преобразуется к однородному матричному уравнению второго рода. Поиск корней редуцированного детерминанта осуществляется методом Ньютона.

В построенных моделях анализ энергетических и фазовых характеристик изучаемых процессов дополняется исследованием спектра собственных частот, полей дифракции и свободных колебаний, что обеспечивает полноту и достоверность физических и прикладных исследований.

Во второй главе построенные модели используются для совместного анализа спектральных и дифракционных характеристик односвязных

(рис. 1, г) и двусвязных (рис. 1, в, ж) металлодиэлектрических структур с аксиальной симметрией из распространенных в технике СВЧ низкопрозрачных ($\text{Re}\epsilon \leq 15$) диэлектриков с малыми ($\text{tg}\delta \leq 10^{-4} - 10^{-2}$) потерями. На примере кольцевых и дисковых ВДР установлены закономерности возникновения резонансных эффектов, расширяющих функциональные возможности этих структур.

Особое внимание уделяется исследованию двухмодовых режимов работы ВДР, привлекательных в практическом отношении, поскольку именно в этих режимах ВДР обладают частотно-селективными свойствами без чрезмерной изрезанности характеристики. Основным источником информации служат зависимости собственных частот и энергии прошедшей волны от геометрии рассматриваемых структур в одномодовых диапазонах Е волны круглого и ТЕМ волны коаксиального волноводов. Такое представление результатов позволяет, с одной стороны, уяснить природу явлений, с другой, - определять оптимальную геометрию конструкций с заданными характеристиками.

Классификация колебаний осуществлялась по типу волны, доминирующей в поле структуры, и распределению поля. Показано, что спектры собственных частот односвязных (двусвязных) структур образуются колебаниями на основной (первой, по величине переносимой энергии) волне, поле которых нарастает по мере удаления от границ ВДР, и колебаниями на высшей (второй) волне, поле которых сосредоточено в объеме структуры и экспоненциально спадает за ее пределами. фазовые соотношения между прямыми и обратными волнами одинаковых номеров в поле колебания определяют симметрию или асимметрию колебания относительно плоскости продольной симметрии структуры. Дифракционная добротность колебаний введена как $Q = -\text{Re}\tilde{\epsilon} / 2\text{Im}\tilde{\epsilon}$, суммарная $Q_{\Sigma}^{-1} = Q_{\text{фб}}^{-1} + Q^{-1}$. Недобротными будем называть колебания с $Q < 10$, добротными - с $Q > 10^2 - 10^3$.

Резонансное отражение падающей волны относится к наиболее интересным эффектам и дает возможность построения режекторных фильтров на ВДР. Выяснилось, что реальные части собственных частот добротных колебаний на высшей (второй) волне определяют частоту режекции тем точнее, чем они более удалены от реальных частей других собственных частот. Исследованы особенности резонансного отражения от ВДР, обусловленные спецификой трактов и типами колебаний. Показано, что преимуществом кольцевых ВДР является возможность управления спектром свободных колебаний и их добротностью. Так, изменяя поперечные размеры ВДР на круглом волноводе, можно получить резонансы отражения на ТЕМ_l ($l = 2, 3, 4, \dots$) или Е_{0n} ($n = 0, 1, 2, \dots$) колебаниях коаксиальной

области, или на E_{01n} ($n = 0, 1, 2, \dots$) колебаниях внутренней полости структуры. Для практических целей важно, что собственные частоты колебаний на ТЕМ волнах и соответствующие частоты резонансов отражения существуют во всем одномодовом диапазоне круглого и коаксиального волноводов. Но только у кольцевого ВДР с резонансным внутренним объемом на круглом волноводе увеличение его длины не приводит к сгущению этих частот.

Отражение, близкое к полному, присуще кольцевым ВДР, резонирующим на колебаниях в полой области структуры. Для ВДР на колебаниях в области с диэлектрическим заполнением эффект наблюдается при потерях в диэлектрике с величиной $\text{tg}^2 \delta$, превышающей дифракционную добротность колебания на один - два порядка, когда она мало отличается от суммарной. Если $\text{tg}^2 \delta$ больше Q_{Σ} в несколько раз, рост поглощения на резонансной частоте до 5-7% уменьшает отражение от ВДР, оставляя глубину подавления прошедшей волны практически неизменной. При слабом поглощении в диэлектрике простые формулы, полученные из условия продольного резонанса высшей (второй) волны, хорошо описывают частоты отражения и геометрию ВДР с добротными колебаниями на этих волнах.

Выявлены общие закономерности образования частотных характеристик ВДР, обусловленные взаимовлиянием колебаний на основной (первой) и высшей (второй) волнах, при возбуждении на частотах, близких к собственным. В частности показано, что при слабом поглощении в диэлектрике конкретные проявления взаимовлияния этих колебаний зависят от соотношения между их добротностями и принадлежности к одному или разным классам симметрии.

Откликом на пару колебаний разных классов симметрии с существенно (на два порядка и более) отличающимися добротностями является несимметричная относительно частоты режекции характеристика с резонансами прохождения и отражения на колебании высшей (второй) волны. При сближении добротностей колебаний точки согласования на характеристике отсутствуют.

В случае колебаний одного класса симметрии частота отражения располагается между частотами прохождения и смещена к реальной части собственной частоты более добротного колебания. Лучшая характеристика режкторного фильтра реализуется на паре колебаний сравнимой добротности. Несколько таких пар формируют характеристику с чередующимися полосами режекции и пропускания.

Установлено, что при наличии дисперсии у котя бы одной из двух резонирующих волн ВДР, возможно вырождение реальных частей собственных частот колебаний на этих волнах. Суперпозиция полей колебаний

разных классов симметрии сопровождается резонансным возрастанием дифракционной добротности колебаний на высшей (второй) волне вплоть до значений $10^5 - 10^6$. На энергетических характеристиках эффект проявляется в виде точки сгущения частот прохождения и отражения.

Обнаружены особенности проявления эффекта межтиповой связи группы недобротных вынужденных колебаний одного и разных классов симметрии в виде аномально широкой полосы режекции, запирающей свыше трети рабочего диапазона круглого волновода.

Исследование поглощающих свойств ВДР показало, что максимальные потери составляют лишь около 50% от энергии возбуждающей волны и наблюдаются на частоте резонанса отражения при концентрации энергии поля в объеме ВДР с потерями в диэлектрике, уменьшающими суммарную добротность колебания вдвое по сравнению с дифракционной. При этом в зависимости от конфигурации ВДР и типа колебания суммарная добротность находится в пределах $(0.5-1.5) \text{tg}^2 \delta$. При превышении этого соотношения потери на поглощение уменьшаются и структура теряет резонансные свойства.

На основании проведенных исследований выработаны конкретные рекомендации по построению режекторных и пропускающих фильтров на ВДР. Определены области значений геометрических и материальных параметров, обеспечивающих их оптимальные характеристики. Приведены формулы для оценочного расчета, предшествующего строгому.

В третьей главе изучается природа резонансных явлений в более сложных структурах, объединяющих несколько многомодовых ВДР, исследованных во второй главе. Рассмотрены естественные в технике СВЧ сочетания из ВДР, параллельно (рис. 1а, д) и последовательно (рис. 1б, е, к) включенных в регулярные волноводы.

Показано, что в целом резонансные свойства первой разновидности ИС при слабом поглощении в диэлектрике можно прогнозировать, опираясь на знание электродинамики парциальных ВДР. Исключением являются области сближения условий существования добротных колебаний в параллельно включенных ВДР.

Выяснилось, что межтиповая связь колебаний одного класса симметрии заключается в обмене типом волны, доминирующей в поле структуры. При этом колебания однозначно классифицируются по распределению поля, а резонанс прохождения между частотами отражения смещается к резонансу отражения на более добротном колебании.

В случае колебаний разных классов симметрии при возбуждении на частоте вырождения реальных частей их собственных частот вырождение снимается. Понижение порядка симметрии связывает вынужденные коле-

бания. В окрестности точки вырождения это приводит к перестройке резонансных характеристик от двухчастотного отражения (на колебаниях в параллельно включенных ВДР) к добротному резонансному прохождению (на колебании структуры как целого с сохранением типа колебания в каждом ВДР). Таким образом, появляется возможность расширения полосы режекции за счет совместного резонанса на двух колебаниях, либо согласования структуры с высокой концентрацией энергии поля в ее объеме.

Последнее обстоятельство стимулировало интерес к изучению влияния потерь на собственные частоты и поглощающие свойства сложных структур при вырожденных состояниях поля. Оказалось, что одна и та же величина потерь вызывает значительное падение суммарной добротности более добротного колебания. При этом реальные части собственных частот колебаний на E_{0n} волнах испытывают крайне малое длинноволновое смещение. Более ошутимый, но коротковолновый уход наблюдался для колебаний на ТЕМ волнах. Возможно полное вырождение комплексных собственных частот колебаний разных классов симметрии. Главное, что в открытых структурах потери в каждом ВДР влияют на собственную частоту колебания другого ВДР.

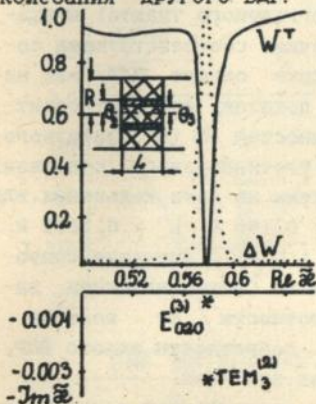


Рис. 2

В результате целенаправленного поиска численно обнаружен эффект близкого к полному резонансного поглощения, не являющийся простой суммой вкладов от поглощения в каждом ВДР, а обусловленный свойствами структуры как целого. На рис. 2 показаны частотные зависимости энергии прошедшей волны $W^T(\omega)$, потерь на поглощение $\Delta W(\omega)$ и собственные частоты (*) для структуры ($\epsilon_2 = 0.902 R$; $\epsilon_3 = 0.901 R$; $L = 0.8643 R$; $\epsilon_2 = 3.6(1 + 1 \cdot 0.0072)$; $\epsilon_3 = 3.6(1 + 1 \cdot 0.00024)$), в которой на $\omega = 0.58076$ поглощается 99% энергии падающей волны. Видно, что эффект реализуется при возбуждении на частоте вырождения реаль-

ных частей собственных частот колебаний разных классов симметрии. Он наблюдается при условии, что суммарная добротность каждого колебания составляет $(0.5 - 0.7) \text{tg}^{-1} \delta$, и может использоваться для построения поглощающих фильтров с полосой от одного до нескольких процентов.

Вторая разновидность исследованных структур образована последовательным включением кольцевых или дисковых ВДР в круглый волновод,

а также Н-плоскостных расширений в прямоугольный волновод. Многомодовые резонаторы в отдельности работают как режекторные звенья с частотой резонанса отражения ω_0 . Показано, что интегральные структуры с каналами связи по основной и затухающим высшим волнам в отрезке регулярного тракта между резонаторами образуют простейшие системы, способные выполнять различные функции при изменении длины области связи D. В характеристиках рассеяния этих структур обнаружены общие (при $\text{tg } \delta = 0$) закономерности.

Установлена связь между спектром собственных частот и резонансными свойствами системы. Обнаружено, что спектр собственных частот образуется недобротными колебаниями системы как целого на основных волнах тракта и ВДР, и добротными синфазным и противофазным колебаниями на высшей (второй) волне ВДР и следующей за основной, затухающей волне тракта.

Поведение собственных частот этих колебаний на комплексной плоскости при изменении длины области связи резко отличается. Спектральные зависимости колебаний на основных волнах плавные, с ростом D добротность колебаний монотонно растет. Собственные частоты синфазного и противофазного колебаний движутся

навстречу, а при $D > \lambda_g$ (λ_g - волноводная длина волн регулярного тракта) вращаются вокруг точки, соответствующей собственной частоте одного ВДР, как на рис. 3. На нем показан фрагмент спектральных зависимостей $\tilde{\omega}(D)$ синфазного (штриховая) и противофазного (сплошная) колебаний системы из двух кольцевых ВДР ($\theta_2 = 0.2 R$; $\theta_3 = 0.199 R$; $L = 0.3299 R$; $\epsilon = 2.08(1 + j 0.0)$). Движение сопровождается строго периодическими вариациями добротности от величин, вдвое меньших добротности одного ВДР, до сверхвысоких значений.

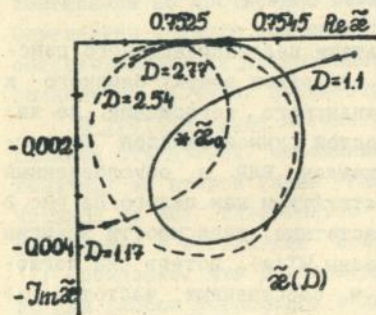


Рис. 3

Выяснилось, что такой характер спектральных зависимостей обусловлен периодичностью сближения условий существования колебаний на основных и высших волнах. Суперпозиция полей колебаний одного класса симметрии на частоте вырождения реальных частей собственных частот сопровождается резонансным возрастанием добротности колебания на высших волнах и ее падением, если колебания принадлежат разным классам симметрии.

При возбуждении системы колебания на основных волнах отвечают за согласование и характеристики системы в целом, а синфазное и противофазное колебания - за двухчастотное резонансное отражение. Частоты вынужденных колебаний на высших волнах зеркальны относительно ω_0 при $D > \lambda_g$ и периодически меняются местами, проходя через точки вырождения реальных частей их собственных частот. В окрестности этих точек резонансы отражения исчезают, так как вынужденные колебания связываются. Уменьшение D до нуля приводит к удалению частот отражения от ω_0 .

Важную роль в образовании и "взаимодействии" колебаний системы играет следующая за основной, затухающая волна тракта. Влияние этой волны особенно ярко проявляется при уменьшении D и приближении к частоте ее отсечки. В резонансных свойствах системы это приводит, в частности, к коротковолновому смещению частот согласования относительно реальных частей собственных частот колебаний на основных волнах.

При исследовании поглощающих свойств системы установлено, что всплески потерь энергии, превышающие потери в одном ВДР, являются откликом уже на три колебания системы: колебание на основных волнах и синфазное и противофазное колебания.

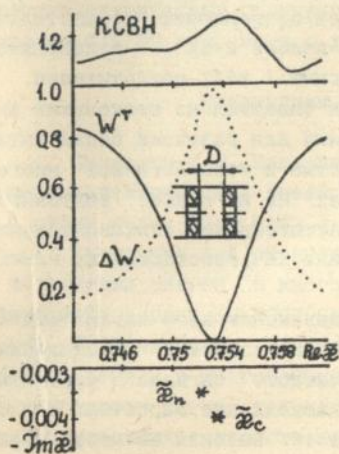


Рис. 4

Обнаружено, что условием практически полного резонансного поглощения в системе является: во-первых, согласование системы с одноволновой "электрической" длиной области связи; во-вторых, выравнивание добротностей синфазного и противофазного колебаний и минимальное отличие реальных частей всех трех собственных частот от ω_0 ; в-третьих, величина $\text{tg } \delta'$, удовлетворяющая условию поглощения в одном ВДР около 50% энергии падающей волны.

На рис. 4 приведены энергетические и спектральные характеристики системы связанных ВДР ($\Theta_2 = 0.2 R$; $\Theta_3 = 0.199 R$; $L = 0.3299 R$; $\epsilon = 2.08(1 + 10.014)$; $D = 1.42 R$), работающей как поглощающий фильтр.

Обнаруженные при анализе динамики спектра собственных частот и резонансных свойств системы эффекты и закономерности свидетельствуют об организованности, упорядоченности "взаимодействий" между ко-

лебаниями на основных и высших волнах. Изменение расстояния между ВДР позволяет эффективно управлять добротностью системы, глубиной подавления сигнала, обеспечивает перестройку частоты и ширины полосы, коррекцию формы частотной характеристики. Увеличивая число ВДР в системе с потерями можно формировать характеристики с заданным числом максимумов поглощения на определенных частотах.

В четвертой главе исследуются возможности использования изученных ВДР и ИС для построения частотно-селективных устройств и их дальнейшей интеграции с активными устройствами С(К)ВЧ. Актуальность исследований обусловлена необходимостью поиска новых технических идей из-за ухудшения выходных характеристик и сложности реализации известных конструкций.

Проведенная оценка устойчивости частотных характеристик ВДР и ИС к отклонениям параметров от расчетных показала реальность создания конструктивно простых средне- и широкополосных режекторных и пропускающих фильтров, узкополосных поглощающих фильтров.

Рассмотрена возможность использования ВДР и ИС в качестве функциональных узлов многосекционных ЛВВ-усилителей КВЧ. Изучение характеристик волноводного вывода энергии типа "двойное окно" показало наличие полос прозрачности (до 6%), достаточно удаленных от частот отражения. Рассчитаны конструкции узлов, позволяющих осуществлять межсекционную развязку ($K_{СВН} < 1.15$ в полосе 2-8%), селективное поглощение (20-50 дБ), а также широкополосных (26%) поглотителей.

В качестве альтернативы коаксиальным фильтрам из нескольких высокоомных и низкоомных секций, используемых для развязки цепей питания в устройствах С(К)ВЧ, предложены простые и технологичные многосвязные коаксиальные фильтры на ТЕМ волнах. На их основе синтезированы частотно-селективные устройства с расширенными функциональными возможностями для усилителя СВЧ и смесителя КВЧ, упрощающие их конструкцию и улучшающие характеристики.

Разработана колебательная система двухконтурного параметрического усилителя и преобразователя КВЧ на сверхразмерных расширениях прямоугольного волновода, прозрачных на частоте сигнала, фильтрующих холостую частоту и частоту накачки. Расхождение расчетных и экспериментальных характеристик не превышает 1%. Высокая точность расчета устраняет необходимость настройки контуров и упрощает обработку параметрического усилителя.

В заключении сформулированы основные результаты и указаны перспективы их технического применения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан и реализован пакет математических моделей и прикладных программ для полного электродинамического анализа и параметрического синтеза практически важных металлодиэлектрических структур в круглом, коаксиальном и прямоугольном волноводах.

2. На основе строгого моделирования и совместного изучения спектральных и дифракционных характеристик выявлены закономерности возникновения эффектов резонансного прохождения, отражения и поглощения волн, расширяющих функциональные возможности металлодиэлектрических структур в многомодовом режиме работы. Установлено, что наблюдаемое многообразие проявления этих эффектов в энергетических характеристиках структур обусловлено особенностями взаимовлияния как свободных, так и вынужденных колебаний и зависит от типа и класса симметрии, близости собственных частот колебаний, соотношений между их добротностями и величиной диэлектрических потерь.

3. Выработаны конкретные рекомендации по использованию обнаруженных эффектов для построения режекторных, пропускающих и поглощающих фильтров. Показано, что многомодовость конструктивно простых металлодиэлектрических структур может служить физической основой для создания С(К)ВЧ устройств с улучшенными выходными характеристиками.

Публикации по теме диссертации

1. Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Поглошающие свойства резонансных металлодиэлектрических ячеек в круглом волноводе // физика и техника мм и субмм волн. - Киев: Наук. думка, 1986. - С. 59-67.

2. Кириленко А. А., Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Эффект резонансного поглощения энергии в многомодовых структурах с диэлектрическими включениями // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1988. №4. - С. 56-59.

3. Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Резонансное отражение и поглощение энергии в многомодовых волноводно-диэлектрических структурах // Всесоюз. научн.-тех. конференция "Проектирование и применение радиоэлектронных устройств на диэлектрических волноводах и резонаторах" : Тез. докл. - Тбилиси, 1988. - С. 84-85.

4. Колебательные системы параметрических усилителей и преобразователей частоты на волноводно-диэлектрических резонаторах / Васильева Т. И., Исиченко В. И., Касьяненко А. П., Рудь Л. А., Цаканян И. С. // Там же. - С. 228 - 229.

5. Колебательные системы параметрических усилителей и преобра-

ДНБ ім. В. Стефанива
АН України

зователей СВЧ на волноводных расширениях // А. А. Сенкевич С. Л., Сухоручко О. Н. Техн. конференция "Современные проблемы радиоэлектроники". Тез. докл. - Москва, 1988. - С. 67.

6. Кириленко А. А., Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Расчет матриц рассеяния металлодиэлектрических неоднородностей в коаксиальном волноводе // Рассеяние электромагнитных волн: Межведомственный тематический научный сборник. - Таганрог, 1989. - Вып. 7. - С. 126-132.

7. Цаканян И. С. Математическое моделирование взаимодействия многомодовых неоднородностей в регулярном волноводе // Научн.-техн. конференция "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем СВЧ на ОИС"; Тез. докл. - Суздаль, 1989. - С. 63.

8. Кириленко А. А., Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Резонансные свойства металлодиэлектрических неоднородностей в круглом волноводе. Харьков, 1990. - 37с. (Препринт/АН УССР, Ин-т радиофизики и электроники: 90-30.

9. Касьяненко А. П., Цаканян И. С. Резонансные поглотители энергии для ЛБВ // Всесоюз. научн.-техн. конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения"; Тез. докл. - Новосибирск, 1990. - С. 71.

10. Касьяненко А. П., Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Строгий анализ функциональных узлов электронных приборов О-типа // X Всесоюз. семинар "Волновые и колебательные явления в электронных приборах О-типа"; Тез. докл. - Ленинград, 1990. - С. 116-117.

11. Кириленко А. А., Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Полная резонансная диссипация энергии в многомодовых волноводно-диэлектрических структурах из "слабопоглощающих" диэлектриков // I Украинский симпозиум по физике и технике мм и субмм волн: Тез. докл. - 1991. - С. 263-264.

12. Сенкевич С. Л., Цаканян И. С. Свободные колебания и резонансные явления в системе связанных многомодовых ВДР // Там же. - С. 276-277.

Цаканян

Ответственный за выпуск Кириленко А. А.

Подписано в печать 19.01.93. Формат 60x84/16

Бум. офс. Офс. печ. Усл.-печ. л. 1. 0. Уч-изд. л. 1. 0

Тираж 100 экз. Заказ 3. Бесплатно

Ротапринт ИРЭ АН Украины
Харьков-85, ул. Ак. Проскуры, 12