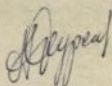


ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

На правах рукописи

БУРСОВ Анатолий Митрофанович



ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАТОРЫ С ПРОТЯЖЕННЫМИ СТУПЕНЧАТЫМИ НЕОДНО-  
РОДНОСТЯМИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ  
МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

01.04.03 - радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Харьков

1992 г.



Робота виконана в Інституті радіофізики і електроніки Академії наук України, г. Харків

Научний керівник - доктор фізико-математических наук,  
професор БУЛГАКОВ Борис Михайлович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук,  
професор ВІНОГРАДОВ Сергій Сергєєвич  
кандидат, фізико-математических наук,  
старший научний співробітник ХАРЬКОВСЬКИЙ  
Сергій Ніколаєвич

Ведуча організація - Харківський державний університет  
ім. А.М.Горького

Захита состоится "16" марта 1993 г. в 16<sup>30</sup> часов на  
заседании специализированного Совета Д016.64.01 в Институте ра-  
диофизики и электроники (310085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры,  
12, актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИРЭ АН  
Украины, г. Харьков, ул. Акад. Проскуры, 12.

Автореферат разослан "16" февраля 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

К.А. Лукин

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Актуальность темы. Отмеченное в последнее время интенсивное освоение миллиметрового (ММ) и субмиллиметрового (СубММ) диапазонов волн оказывает стимулирующее влияние на исследования в области создания новой элементной базы, способной удовлетворить самые высокие требования, предъявляемые разработчиками СВЧ систем различного назначения. В частности, это касается приборов и устройств резонансного типа (твердотельные генераторы, смесители, элементы измерительной техники и т.д.), основной составной частью которых является колебательная система.

Если оставаться в рамках элементной базы, присущей более длинноволновому - сантиметровому (СМ) - диапазону волн, то создание подобных приборов и устройств в ММ и СубММ диапазонах волн наталкивается, как нетрудно показать, на серьезные трудности.

Действительно, как известно, основным типом колебательных систем в СМ диапазоне волн являются объемные резонаторы, сформированные на базе волноводной техники. При укорочении длины волны и продвижении в область ММ и СубММ диапазонов волн параметры подобных резонансных систем существенно ухудшаются. Например, из-за резкого уменьшения сечения волноводов, вызванного стремлением избежать возникновения многомодового режима (теорема Рэлея-Джинса-Куранта), происходит значительное увеличение уровня тепловых (омических) потерь в стенках линий передач волноводного типа. В результате наблюдается существенное снижение добротности колебательной системы, обуславливающее рост нестабильности частоты генератора и, как следствие, увеличение уровня ЧМ шума вблизи несущей. По тем же причинам возникает трудности технологического характера, связанные с размещением твердотельных активных и пассивных элементов вместе с сопутствующей оснасткой в волноводной камере весьма малых поперечных размеров.

Одним из путей преодоления указанных трудностей, как извест-

но, является применение в качестве колебательных систем приборов и устройств ММ и СуММ диапазонов волн открытых резонаторов (ОР), нашедших в настоящее время широкое применение не только в квантовой электронике (оптический и инфракрасный диапазоны волн), но и непосредственно в квазиоптике (ММ и СуММ диапазоны волн).

Однако не любой ОР может выполнять функции эффективной колебательной системы конкретного прибора или устройства ММ и СуММ диапазонов волн. В частности, к подобным ОР могут быть отнесены классические пустые резонаторы, образованные зеркалами правильной геометрической формы. Размещение в объеме или на поверхностях зеркал резонатора таких дополнительных массивных структур, как трансформаторы импеданса, играющие одновременно роль теплоотвода, лишают права относить эти открытые колебательные системы к классическим ОР.

Приведенные соображения наводят на мысль о том, что в качестве открытых колебательных систем приборов и устройств ММ и СуММ диапазонов волн могут быть использованы только неоднородные ОР. Но указанный класс сложных в геометрическом смысле резонансных систем к настоящему моменту времени изучен весьма слабо, особенно в теоретическом плане.

Все сказанное позволяет сделать вывод об актуальности тематики, затронутой в материалах настоящей диссертации и связанной с исследованием электродинамических свойств неоднородных квазиоптических ОР.

Цель работы заключается в систематическом теоретическом и экспериментальном изучении электродинамических свойств ОР с протяженными ступенчатыми неоднородностями, в выяснении механизма потерь в подобных открытых колебательных системах и в использовании полученных результатов при разработке конкретных приборов и устройств ММ и СуММ диапазонов.

Научная новизна. Осуществлена попытка решить задачу по изучению ОР с протяженными неоднородностями, имеющими ступенчатую конфигурацию и расположенными как на поверхностях зеркал, так и в пространстве между зеркалами.

Впервые теоретически, в рамках предложенного в настоящей работе подхода, получены и экспериментально подтверждены результаты расчета плоского неоднородного ОР с одним из зеркал, деформированным в виде одиночной ступени произвольной высоты. Показано, что данная задача является ключевой по отношению к классу неоднородных плоских ОР с зеркалами, деформированными в виде набора ступеней (канавки, выступы, гребенчатая и шелетная дифракционные решетки и т.д.).

Теоретически, на основе предложенного геометрикооптического подхода, и экспериментально исследованы электродинамические свойства таких дисперсионных открытых колебательных систем, как двух- и трехзеркальные шелетные ОР. Теоретически, в рамках предложенного подхода, связанного с представлением поля ОР в виде двух бегущих навстречу друг другу плоских волн, и экспериментально изучен механизм взаимодействия резонансного поля со ступенчатой неоднородностью типа прямоугольный идеально проводящий цилиндр, размещенный между зеркалами резонатора.

Исследованы процессы, протекающие внутри открытых колебательных систем дисперсионного типа впервые разработанных приборов и устройств ИМ диапазона.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов определяется: в теоретической части - применением математически обоснованных методов и сопоставлением расчетных результатов с опытными данными, в экспериментальной части - воспроизводимостью полученных результатов.

Практическая ценность работы заключается в создании полупроводниковых твердотельных генераторов с открытой дисперсионной колебательной системой, обладающих высокой кратковременной стабильностью частоты, низким уровнем частотных шумов и мощностью, сравнимой с мощностью источников колебаний волноводного типа, а также резонансного квазиоптического смесителя, имеющего ряд преимуществ над преобразователями волноводного типа в коротковолновой части ММ и СубММ диапазонов волн.

Реализация разработок. Серия квазиоптических твердотельных генераторов со сфероуголковозшелеттной открытой колебательной системой ММ диапазона волн (ГКП-8,3; ГКУ-8,5,3,3А), созданная в результате проведенных исследований в ИРЭ АН Украины, внедрена в следующих организациях: ИРЭ АН Украины, г. Харьков; СКТБ ИРЭ АН Украины, г. Харьков; РИ (Радиоастрономический институт) АН Украины, г. Харьков; НПО "Сатурн", г. Киев; ИФП (Институт физики полупроводников) Сибирского отделения АН России, г. Новосибирск; НИИФП (Научно-исследовательский институт физических проблем) Министерства электронной промышленности России, г. Зеленоград Московской обл.; НИИ Приборостроения, г. Москва.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

I. В рамках предложенного подхода к решению двумерной спектральной задачи о собственных колебаниях в плоском ОР с протяженными ступенчатыми неоднородностями показано, что деформация зеркала в виде одиночной ступени произвольной высоты сопровождается деформацией амплитудного распределения поля с последующим "выталкиванием" поля из узкой части ОР в широкую при таком значении высоты ступени, однозначно связанном с данной модой, при котором частота главной волноводной гармоники близка к частоте ее отсечки в узкой части ОР. Механизм дифракционных потерь в де-

формируемом плоском ОР заключается во взаимной трансформации волны, формирующих поле резонатора и последующем излучении их в свободное пространство. Скачкообразная деформация зеркала является причиной разрежения спектра ОР с максимумом (минимумом) селекции при четвертьволновой (полуволновой) высоте ступени, а также порождает эффект аномально резкого нарастания частоты и добротности ОР, возбуждаемого на одной из высших мод, что объясняется "запиранием" соответствующей волноводной гармоники в узкой части ОР при изменении высоты ступени внутри определенного интервала значений.

2. Система протяженных ступенчатых неоднородностей, образующих зеркала типа "шелетт", в совокупности с отражателем, обладающим фазовой коррекцией по апертуре, формируют высокодобротный дисперсионный ОР со спектром, разреженным как по поперечным, так и по продольным типам колебаний. Эффект, связанный с ростом добротности сферозшелеттного ОР при отклонении режима колебаний в резонаторе от классического автоколлимационного, обусловлен наличием в составе дисперсионного ОР фазокорректирующего (сферического) зеркала, позволяющего фокусировать поле в направлении "новой" оси ОР, ориентированной примерно под брилленовским углом относительно "старой" оси резонатора.

3. Трехзеркальный сферозшелеттный ОР представляет собой открытую колебательную систему, распадающуюся на несколько парциальных контуров: два не связанных между собой двухзеркальных резонатора, в которых возбуждаются Н-поляризованные колебания и один общий резонатор, образованный всеми тремя зеркалами с Е-поляризованными колебаниями внутри единого резонансного объема.

4. Идеально проводящий цилиндр, толщина которого меньше ширины, кратной половине длины волны, вносит максимум (минимум)

потерь в резонатор, если боковые узкие грани бруска локализованы в максимумах (минимумах) стоячей волны электрической компоненты поля. Механизм потерь в ОР с прямоугольным цилиндром обусловлен законом распределения плотности тока на поверхностях граней бруска: в максимуме потерь каждая из граней неоднородности представляет собой уединенную в пространстве антенну с косинусоидальным распределением плотности тока по апертуре; в минимуме потерь вся поверхность бруска суть единая сильно связанная излучающая система, при этом наличие резонансной ширины у прямоугольного цилиндра порождает эффект компенсации волн, излучаемых всей поверхностью неоднородности.

5. Вся совокупность результатов по исследованию электродинамических свойств ОР с протяженными неоднородностями явилась основой для создания ряда квазиоптических приборов, обладавших уникальными характеристиками в миллиметровом диапазоне длин волн.

Апробация работы и публикации. Результаты, приведенные в материалах диссертации неоднократно обсуждались на научных семинарах отделения "Физика твердого тела" ИФЭ АН Украины и докладывались на: II Всесоюзном симпозиуме по миллиметровым и субмиллиметровым волнам (Харьков, 1978 г.), III Всесоюзном симпозиуме по миллиметровым и субмиллиметровым волнам (Горький, 1980 г.), II Всесоюзном симпозиуме "Эффект Ганна и его применение" (Новосибирск, Академгородок, 1982 г.), Всесоюзном семинаре "Функциональная СВЧ электроника" (Киев, 1983 г.), Всесоюзном научно-техническом семинаре "Проблемы повышения эффективности и качества электронных приборов (вакуумные и твердотельные приборы СВЧ)" (Киев, 1983 г.), X Всесоюзной научной конференции "Электроника сверхвысоких частот" (Минск, 1983 г.), XI Всесоюзной научной конференции "Электроника

сверхвысоких частот" (Орджоникидзе, 1986 г.), III Всесоюзной школе по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере (Харьков, 1989 г.), International School on Microwave Physics and Technique (Bulgaria, Varna, 1989), Krajowe Sympozjum Telekomunikacji (Polaca, Bydgoszcz, 1990), International Conference on Millimeter Waves and Far-Infrared Technology (China, Beijing, 1990), 16th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (Switzerland, Lausanne, 1991),

IV Всесоюзной школе по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере (Нижний Новгород, 1991 г.), Всесоюзном научно-техническом совещании "Малоп шумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии (Иркутск, 1991 г.), I Украинском симпозиуме "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн" (Харьков, 1991 г.).

Разработанный при участии автора квазиоптический твердотельный генератор ММ диапазона волн экспонировался на Выставке достижений народного хозяйства УССР (Киев, 1989 г., диплом второй степени и серебряная медаль), Открытой ярмарке научно-технических разработок и новых образцов товаров народного потребления (Москва, 1990 г., серебряная медаль), Международной научно-технической выставке "Наука в Украинской ССР" (Индия, 1990 г.). Основные результаты диссертации опубликованы в 37 печатных работах и 9 описаниях авторских свидетельств на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 109 стр. основного текста, 96 страниц рисунков и список литературы из 138 наименований на 15 страницах.

## Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, представлен краткий анализ существующих методов решения задач, ориентированных на поиск собственных частот ОР, и дана их краткая сравнительная характеристика. В этом же разделе сформулирована цель работы, кратко изложено ее содержание. Завершается введение формулировкой положений, выносимых на защиту, а также сведениями, связанными с апробацией работы.

В первой главе с помощью предложенного в настоящей работе подхода решена ключевая модельная задача о собственных колебаниях в плоском ОР с одним из зеркал, деформированным в виде одиночной ступени произвольной высоты. В основу предложенного подхода положены: волноводная концепция "удержания" поля в объеме открытой колебательной системы, разработанная Л.А.Вайнштейном, и метод обобщенной матрицы рассеяния. Основная идея подхода заключается в сведении неоднородной резонаторной задачи к волноводной с последующим расчленением сложной волноводной неоднородности на ряд элементарных структур, для которых известны решения соответствующих дифракционных задач. Сопоставляя затем открытым концам ОР матричные операторы взаимного преобразования волн и связывая все неоднородности или соответствующие им матричные операторы в единую систему посредством введения фазовых операторов распространения волн, получим систему операторных уравнений относительно неизвестных векторов амплитуд волн, распространяющихся в отрезке неоднородного плоского волновода. В результате решения системы операторных уравнений получено дисперсионное уравнение, предназначенное для поиска безразмерных комплексных частот  $\alpha = \frac{\alpha}{\lambda} = \alpha' - i\alpha''$  ( $\alpha'' > 0$ ), где:  $\alpha$  - расстояние между зеркалами невозмущенного ОР,  $\lambda$  - длина волны в свободном пространстве.

Рассмотрена ситуация, при которой между зеркалами с нормированными апертурными размерами  $\eta = 5$  ( $\eta = \frac{2\ell}{a}$ , где  $2\ell$  - истинная апертура отражателей) укладывается примерно одна полуволна поля ( $0,5 \leq \alpha' \leq 1,0$ ). Выбор этот обусловлен высокой скоростью счета на ЭВМ и относительной простотой физической интерпретации полученных результатов. В системе распространяются волны типа  $TM_{op}$  - случай, максимально приближенный к эксперименту. Алгоритм поиска комплексных корней дисперсионного уравнения основан на последовательном применении метода Миллера.

Поставленная задача разрешима, поскольку в основе предлагаемого подхода лежит хорошо зарекомендовавший себя при решении широкого класса электродинамических задач метод обобщенной матрицы рассеяния.

В результате расчетов установлено, что при варьировании нормированной высоты ступени  $\tilde{h} = 1 - \theta$  ( $0 \leq \tilde{h} \leq 1,0$ ,  $\theta = \frac{b}{a}$ , где  $b$  - высота узкой части ОР) с малым шагом корни дисперсионного уравнения группируются в ветви, обозначенные индексами  $p$ . При этом число ветвей совпадает с количеством исследуемых типов колебаний  $TEM_{p01}$ . Обнаружено, что спектр ОР состоит из традиционных мод, для которых выполняются резонансные условия между зеркалами, и низкочастотных "поршневых" видов колебаний, которые характеризуются наличием резонанса между открытыми концами ОР.

Детально исследовано поведение зависимостей  $\alpha'_{p01}(\tilde{h})$  и  $\alpha''_{p01}(\tilde{h})$ , а также дано физическое объяснение полученным результатам. Установлено резкое отличие в характере поведения кривых  $\alpha'_{p01}(\tilde{h})$  и  $\alpha''_{p01}(\tilde{h})$ , характеризующих основную моду  $TEM_{p01}$  и высшие типы колебаний.

Обсуждается аномальное поведение высшей моды  $TEM_{301}$ , сопровождающееся резким уменьшением декремента затухания в ОР при тех значениях  $\tilde{h}$ , при которых остальные типы колебаний обладают

максимальным уровнем потерь:  $t_1 \approx \frac{\lambda}{4}$ .

Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что возмущение плоского ОР ступенью высотой  $t_1 = \frac{\lambda}{2}$  минимально. Выявлена и детально исследована связь между деформацией поверхности зеркала ОР и деформацией электрических (магнитных) компонент полей как традиционных, так и "поршневых" типов колебаний в ОР.

Изучено поведение "поршневых" мод, показано, что они способствуют сгущению спектра ОР.

Исследован механизм дифракционных потерь в деформируемом плоском ОР на основе введенного в работе понятия - элементарных каналов рассеяния, представляющих собой дискретные наборы комбинаций преобразований на неоднородности (неоднородностях) волны с индексом  $j$  в волку с индексом  $i$ . Чем больше соответствующий энергетический коэффициент трансформации  $W_{ij}^n$ , равный произведению энергетических коэффициентов трансформации на каждой неоднородности  $W_{ij}$ , тем более эффективно накапливается электромагнитная энергия внутри данного циклического (самовоспроизводящегося) канала рассеяния, тем выше добротность  $Q$  ОР при соответствующей высоте ступени.

Рассмотренная в настоящей работе задача является ключевой при исследовании комплексного спектра сложных ОР с конечным числом скачкообразных неоднородностей на зеркалах и произвольными значениями безразмерной частоты  $\mathcal{X}$ .

Во второй главе изложены результаты, относящиеся к изучению электродинамических свойств ОР с периодической системой ступенчатых протяженных идеально проводящих неоднородностей на поверхности одного из зеркал.

Показано, что подобная открытая колебательная система, обладающая высокой степенью разрежения спектра, относится к классу дисперсионных ОР, и носит название ОР с шелетным зеркалом.

В начале главы изложены результаты экспериментального исследования электродинамических свойств сферозелетного ОР (СЭ ОР), образованного эшелетным и сферическим зеркалами. Обнаружен и детально исследован эффект значительного увеличения нагруженной добротности  $Q_n$  СЭ ОР при отклонении режима его возбуждения от классического автоколлимационного: для случая эшелетта с прямоугольниками, равными по величине гранями, угол качания  $\beta$  эшелетта (угол, образованный осью ОР и плоскостью решетки) равен не  $45^\circ$ , как ожидалось, а  $\sim 41^\circ$ .

Дана физическая интерпретация механизма потерь в СЭ ОР, базирующаяся на введенном в настоящей работе понятии дисперсионных потерь (высвечивание части энергии колебаний в свободное пространство через  $m$  порядков дифракции) и на предложенном теоретическом способе описания процессов в дисперсионных ОР, который заключается в представлении поля внутри резонатора в виде системы лучей, падающих и отражающихся от поверхностей зеркал. При этом сам акт взаимодействия луча с поверхностью дисперсионного зеркала описывается в терминах строгой теории дифракции.

Показано, что значение угла наклона эшелетта  $\delta$  к оси СЭ ОР ( $\delta = 90^\circ - \beta$ ), минимизирующее функцию  $n(\delta)$ , где  $n$  - число элементарных проходов, образующих один полный проход в открытом дисперсионном ОР, близко к величине угла  $\delta$ , при котором  $Q_n$  СЭ ОР достигает максимума.

На основании полученных результатов сформулировано правило, согласно которому для дисперсионных ОР выполняется соотношение:

$$Q(\beta) \sim n^{-1}(\beta)$$

Установлено, что указанное соотношение - условие необходимое, но недостаточное для достижения  $Q_{max}$  в дисперсионном ОР. Достаточным условием существования добротных колебаний является распростра-

нение лучей, формирующих данную моду, в пределах лучевой трубки малого поперечного сечения с осью, ориентированной в направлении брилловновского угла, характеризующего распространение луча в отрезке волновода с открытыми концами - аналоге ОР.

В отдельном разделе второй главы диссертации приведены результаты исследования трехзеркального СЭ ОР, относящегося к классу связанных многозеркальных открытых колебательных систем.

Экспериментально и теоретически, на основе метода четырехполюсников, распространенного на случай ОР с дисперсионным отражателем, проанализированы варианты возбуждения колебаний в трехзеркальном СЭ ОР: 1) случай Н-поляризации ( $\vec{E} \perp$  образующим решетки), при котором резонатор распадается на два практически несвязанных парциальных СЭ ОР (связь между парциальными СЭ ОР возникает только на длинных волнах); 2) случай Е-поляризации ( $\vec{E} \parallel$  образующим решетки), при котором резонатор образует единую колебательную систему в силу наличия связи между парциальными СЭ ОР, возникающей вследствие трансформации рассеянного поля из  $m = -1$  в  $m = 0$  порядки дифракции; 3) комбинированный случай Н (Е)-поляризации, при котором в резонаторе имеют место независимые колебания на различных резонансных частотах.

В третьей главе рассмотрено влияние протяженной ступенчатой неоднородности, расположенной в пространстве между зеркалами, на свойства ОР. Преследовалась цель выяснить специфику механизма взаимодействия подобного объекта с резонансным полем.

В рамках предложенного в настоящей работе теоретического подхода, основанного на представлении поля ОР в виде двух бегущих навстречу друг другу плоских волн, рассеивающихся на протяженной неоднородности, показано, что проводящий прямоугольный цилиндр вносит в ОР минимальные потери, если его ширина  $2a_2$  кратна  $\frac{\lambda}{2}$ , толщина  $2a_1 < 2a_2$ , а его узкие боковые грани размещены в смеж-

ных лучностях стоячей волны магнитной компоненты поля. Как показали расчеты, связанные с определением диаграммы рассеяния бруска в поле двух плоских волн и распределения плотности токов на его поверхности, минимум потерь в ОР объясняется резким уменьшением нормированного сечения рассеяния  $\frac{G}{4a_2}$  прямоугольного цилиндра, обусловленным наличием компенсационного механизма, который заключается во взаимном подавлении полей, излученных противоположными гранями бруска (по поверхностям узких граней, разделенных полуволновой базой, токи протекают в одном направлении, т.е. являются противофазными; токи на поверхностях каждой из широких граней протекают навстречу друг другу, т.е. тоже являются противофазными, стремясь к нулю в средней части каждой из широких граней).

Приведена интерпретация полученных результатов, базирующаяся на основных положениях физической теории дифракции.

Получено приближенное выражение, связывающее  $Q_H$  ОР с нормированным сечением рассеяния  $\frac{G}{4a_2}$  бруска в поле двух плоских волн. Сравнение с экспериментом позволило сделать вывод о корректности применения методов, описывающих рассеяние волн на телах, расположенных в свободном пространстве, к задачам, связанным с определением  $Q_H$  в неоднородных ОР.

Теоретически и экспериментально изучено влияние параметров прямоугольного цилиндра и его ориентации в пространстве между зеркалами на потери в ОР.

Приведена физическая интерпретация полученных результатов.

В четвертой главе изложены вопросы, связанные с практической реализацией полученных в настоящей работе научных результатов. В частности, приведены конструкции квазиоптических источников колебаний ММ диапазона волн, разработанных на базе дисперсионных ОР с эшелетной решеткой. К указанным приборам относятся твердотельные генераторы с квазиодночастотной открытой сферическешелетной коле-

бательной системой (двухзеркальный и трехзеркальный варианты) и со сферуголковошелеттной открытой резонансной системой.

Результаты исследований показали, что перечисленные источники колебаний отличаются высокой стабильностью частоты генерации, обусловленной значительной добротностью  $Q_n$  шелеттной ОР, низким уровнем шумов, высоким качеством спектра и устойчивостью генерации как результата существенного разрежения спектра открытой колебательной системы.

Для квазиоптического генератора 8-мм диапазона волн на лавинно-пролетном диоде уходы частоты  $f$  меньше  $10^{-6}$  за минуту. Частотные флуктуации меньше  $-85$  дБ/Гц (для квазиоптического генератора на диоде Ганна меньше  $-90 + -100$  дБ/Гц) при отстройке частоты от несущей на 10 кГц, что примерно на 20 дБ ниже по сравнению с аналогичным параметром генераторов волноводного типа.

Особый интерес вызывает использование шелеттной ОР в качестве колебательной системы квазиоптического генератора коротковолновой части ММ диапазона волн. В подтверждение сказанному в работе приведены результаты измерения параметров генераторов, работающих в этой части ММ диапазона волн и используемых по назначению в конкретных действующих системах СВЧ. В частности, квазиоптический полупроводниковый генератор, имеющий стабильность частоты за минуту не хуже  $10^{-7}$  на частоте генерации  $f \approx 115$  ГГц, может считаться конкурентоспособным по сравнению с источниками колебаний подобного класса.

В отдельном разделе четвертой главы представлены результаты исследований параметров приборов 8-мм диапазона волн, выполненных на базе трехзеркальной открытой сферозшелеттной колебательной системы: генератора на диоде Ганна, работающего в режиме одновременной полигармонической асинхронной генерации и квазиоптического смесителя.

Теоретически, на основе метода эквивалентных схем с использованием экспоненциальной аппроксимации ВАХ диода Ганна, и экспериментально изучены характеристики активного прибора. Полученные результаты позволяют глубже понять специфику работы источника колебаний в режиме одновременной асинхронной генерации и наложить ряд ограничений на его параметры.

В работе рассмотрена практическая реализация идеи смешивания двух сигналов ММ диапазона волн с различными частотами в двухконтурной колебательной системе открытого типа. Полученные результаты свидетельствуют о плодотворности исследований в этом направлении и преимуществах, возникающих при использовании смесителя, выполненного на базе трехзеркального СЗ ОР, в коротковолновой части ММ и СубММ диапазонов длин волн.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и указаны перспективные области их применения.

#### Основные результаты и выводы работы

1. Рассмотрена в общей постановке, представляющая научный и практический интерес, задача, связанная с исследованием влияния идеально проводящих протяженных ступенчатых неоднородностей на свойства ОР. Общий характер проблемы обусловлен тем обстоятельством, что указанные неоднородности, как одиночные, так и неодиночные (в том числе периодические), располагаются и на поверхностях зеркал, и в промежутке между ними.

2. На примере решения модельной спектральной задачи, ориентированной на поиск собственных колебаний в плоском ОР с одиночной ступенчатой неоднородностью на поверхности одного из зеркал, показана возможность применения предложенного в настоящей работе теоретического подхода к более широкому классу задач по определению комплексного спектра ОР с неоднородностями

щими более сложной ступенчатой конфигурацией.

3. Достигнут определенный уровень в понимании процессов, протекающих внутри ОР с зеркалом, деформированным в виде одиночной ступени, и, в частности, удалось выяснить механизм потерь в подобной колебательной системе; установить связь между деформацией зеркала и степенью искажения топологии поля в ОР; теоретически показать и экспериментально подтвердить факт минимизации потерь в резонаторе при резонансной, т.е. полудюймовой высоте ступени; выявить определяющую роль явления междутипового взаимодействия в процессе деформации зеркала ОР, включая эффект аномального поведения отдельного высшего типа колебания, связанный с резким увеличением как его резонансной частоты, так и добротности при стремлении высоты ступени к половине длины волны.

4. Показано, что увеличение количества ступенчатых неоднородностей на поверхности одного из зеркал (единственное условие - система неоднородностей должна быть периодической) оказывает двойное воздействие на свойства резонатора. С одной стороны проявляются основные особенности ОР с одной неоднородностью: в частности, минимум потерь имеет место для резонансных неоднородностей, высота которых кратна  $\frac{\lambda}{2}$ . С другой стороны сказывается специфика, присущая дифракционной решетке: зеркало отражает падающую на него волну как единое целое в соответствии с формулой решетки. Вместе с тем, обнаружено, что определяющая роль в формировании добротного дисперсионного ОР принадлежит не только решетке, но и гладкому зеркалу: если последнее обладает фазовой коррекцией по апертуре, то имеет место отклонение режима колебаний от классического автоколлимационного, сопровождающееся увеличением добротности колебательной системы. Представляет также интерес использование поляризационных свойств шпелетта с целью образования трехзеркальной открытой коле-

бательной системы, в которой возможно возбуждение на двух различных частотах поляризационно развязанных полей, заполняющих весь резонансный объем.

5. Логическим завершением данного этапа исследований является изучение влияния ступенчатой протяженной неоднородности, расположенной теперь уже в пространстве между зеркалами, на свойства ОР. Полученные результаты свидетельствуют о том, что и в этом случае проявляются особенности, присущие одиночной неоднородности, в частности, имеет место резонансный характер механизма потерь, который состоит в том, что прямоугольный проводящий цилиндр полуволновой ширины вносит минимум потерь в открытую колебательную систему. Вместе с тем, наблюдаются и специфические отличия: поскольку тело находится между зеркалами, определяющая роль в достижении эффекта минимального возмущения поля ОР начинает принадлежать соответствующей ориентации объекта относительно характерных сечений стоячей волны поля и согласованию геометрии боковых узких граней с конфигурацией фазовой поверхности стоячей волны поля. В работе экспериментально обнаружены и теоретически подтверждены необходимые и достаточные условия минимального возмущения ОР протяженной ступенчатой неоднородностью, расположенной между зеркалами. Кроме того выявлен механизм потерь в ОР с подобного типа неоднородностью и детально исследовано влияние всех параметров, описывающих геометрию бруска и его ориентацию в пространстве между зеркалами на добротность открытой колебательной системы.

6. На основании полученных результатов разработан ряд конкурентоспособных квазиоптических приборов ММ диапазона волн, обладающих, как показали исследования их характеристик, уникальными параметрами.

7. Представляет интерес дальнейшее развитие тематики, затро-

нутой в настоящей работе. В частности, самостоятельный интерес представляют задачи, связанные с рассмотрением плоских ОР (случай  $\mathcal{E} > 1$ ) с неоднородностями типа выступ, канавка и их комбинации, а также экспериментальное и теоретическое изучение электродинамических свойств дисперсионных ОР.

#### Основные публикации по теме диссертации

1. Фурсов А.М., Леонов В.И., Булгаков Б.М. Особенности поведения спектра частот плоского открытого резонатора при ступенчатой деформации зеркал //Письма в ЖТФ. - 1988. - 14, № 14. - С. 1290-1294.
2. Булгаков Б.М., Леонов В.И., Фурсов А.М. Математическая модель задачи о собственных колебаниях в плоском открытом резонаторе со ступенчатым зеркалом //Радиофизика и электроника миллиметровых и субмиллиметровых волн: Сб. научн. трудов - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1988. - С. 101-109.
3. Булгаков Б.М., Леонов В.И., Фурсов А.М. Исследование плоского открытого резонатора с прямоугольной ступенью на зеркале //Радиофизика и электроника миллиметровых и субмиллиметровых волн: Сб. научн. трудов - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1988. - С. 110-118.
4. Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Эффективный твердотельный квазиоптический генератор с резонансной системой типа "модифицированный эшелетный открытый резонатор" //В кн.: Тезисы докладов 10-й Всесоюз. научн. конф. "Электроника СВЧ", Минск. - 1983. - Т. 2. - С. 133-134.
5. Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Исследование многозеркальных открытых резонаторов с эшелеттом //В кн.: Тезисы докл. 3-го Всесоюз. симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым

- волнам, Горький. - 1980. - С. 117-118.
6. Исследование квазиоптического открытого резонатора с одной и несколькими проводящими пластинами между зеркалами /Б.М.Булгаков, В.Н.Скресанов, А.И.Фисун, А.М.Фурсов //Радиотехника - Харьков: Изд-во при Харьк. гос. универ. изд-го объедин. "Вища школа", 1981. - Вып. 56. - С. 21-29.
  7. Эффект взаимодействия полей открытых резонансных систем с проводящими прямоугольными цилиндрами /Б.М.Булгаков, Э.И.Велиев, В.В.Веремей, А.М.Фурсов, В.П.Шестопалов //ЖТФ. - 1990. - 60, № 6. - С. 182-186.
  8. Квазиоптические генераторы на диодах Ганна и ЛПД с открытым сферическим резонатором /А.В.Архипов, О.И.Белов, ..., А.М.Фурсов //ПТЭ. - 1991. - № 3. - С. 106-109.
  9. Quasi-Optical Solid-State Generator / A.V.Arhipov, O.I.Belous, ..., A.M.Fursov //In: Proc. of Internat. School on Microwave Physics and Technique, Varna, Bulgaria. - 1989. - P.149.
  10. Millimeter Wave Stable Solid-State Sources with Sphero-cornechelette Open Oscillating System / A.V.Arhipov, O.I.Belous, ..., A.M.Fursov //In: Proc. of Internat. Conf. on Millimeter Wave and Far Infrared Technology, Beijing, China. - 1990. - P.539-540.
  11. Low-Noise InP Gunn Oscillator with Sphere-Echelle Open Oscillating System /O.I.Belous, B.M.Bulgakov, ..., A.M.Fursov //In: Proc. of 16th Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Lousanne, Switzerland. - 1991. - P.78-79.
  12. Echelectron - Source of Millimeter Wave Range with High Quality Spectrum /A.Ja.Belukcha, B.M.Bulgakov, ..., A.M.Fursov //In: Proc. of 16th Internat. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Lousanne Switzerland. - 1991. - P.9-10.
  13. Булгаков Б.М., Фисун А.И., Фурсов А.М. Двухчастотная асинхронная устойчивая генерация на диоде Ганна в открытой резонансной

системе //Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1983. - 26, № 10. - С. 80-82.

14. Фурсов А.М. Расчет генератора на диоде Ганна в двухконтурной колебательной системе с некрatными резонансными частотами // Твердотельные генераторные и преобразовательные приборы ММ и СубММ диапазонов волн: Сб. научн. трудов - Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1969. - С. 25-32.
15. Фурсов А.М. Резонансный преобразователь частоты миллиметрового диапазона волн квазиоптического типа //Физика и техника ММ и СубММ диапазонов волн: Сб. научн. трудов - Харьков: Наукова думка, 1983. - С. 303-305.
16. А.с. № 1352409 (СССР). Устройство для визуализации электромагнитных полей в открытом резонаторе /Б.М.Булгаков, В.И. Леонов, А.И.Фисун, А.М.Фурсов. - Опубл. 15.II.87. БИ № 42.
17. А.с. № 1309870 (СССР). Генератор СВЧ /О.И.Белоус, В.М.Булгаков, А.И.Фисун, А.М.Фурсов. - Опубл. 23.II.89. БИ № 43.
18. А.с. № 1540616 (СССР). Генератор /А.В.Архипов, О.И.Белоус, ..., А.М.Фурсов. - Опубл. 15.01.91. БИ № 2.
19. А.с. № 1612846 (СССР). Генератор дифракционного излучения /В.К. Корнеенков, В.С.Мирошниченко, А.И.Фисун, А.М.Фурсов. - (Разрешено к публикации в открытой печати Президиумом АН Украины 01.10.91).
20. А.с. № 1370712 (СССР). Генератор /О.И.Белоус, В.М.Булгаков, В.А. Епишин, А.И.Фисун, А.М.Фурсов. - Опубл. 30.01.88. БИ № 4.
21. А.с. № 1060085 (СССР). Полупроводниковый генератор /В.М.Булгаков, А.И.Бородкин, А.И.Фисун, А.М.Фурсов. - Опубл. 23.II.89. БИ № 43.
22. А.с. № 1176438 (СССР). Полупроводниковый генератор /А.И.Бородкин, В.М.Булгаков, ..., А.М.Фурсов. - Опубл. 30.08.85. БИ № 32.
23. А.с. № 944071 (СССР). Преобразователь частоты /В.М.Булгаков, В.Н.

- Скресанов, А.И. Фисун, А.М. Фурсов. - Оpubл. 15.07.82. БИ № 26.
24. А.с. № 820612 (СССР). Генератор сверхвысоких частот /А.В.Архипов, Б.М.Булгаков, ..., А.М.Фурсов. - Оpubл. 15.07.82. БИ № 26.
25. Особенности режима автоколлимации в дисперсионном открытом резонаторе с фазокорректирующим зеркалом /О.И.Белоус, Б.М.Булгаков, А.И.Фисун, А.М.Фурсов //Письма в ЖТФ. - 1992. - 19, № 4, - С. 46-52.

Ответственный за выпуск А.И.Фисун

---

Подписано в печать 15.02.93.

Формат бумаги 60 x 90 x 1/16. Объем 1 физ.п.л.

Заказ № 16. Тираж 100 экз. Бесплатно.

---

Ротап rint ИРЭ АН Украины. Харьков-85, ул. Акад. Проскуры, 12

470130

78 26.775  
**AB 26.775**