

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
АКАДЕМИИ НАУК УКРАИНЫ

На правах рукописи

ФИЛИППОВ КРИЙ ФЕДОРОВИЧ

РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ
В ОГРАНИЧЕННЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

(01.04.03 - " Радиофизика ")

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

Харьков
1992

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени
Институте радиофизики и электроники АН Украины, г. Харьков.

Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук проф. Хижняк Николай
Антонович (ФТИ АН Украины, г. Харьков),
доктор технических наук, зав. отделом Мериакри Владислав
Владиславович (ИРЭ Российской АН, г. Москва),
доктор физико - математических наук проф. Бакай Александр
Степанович (ФТИ АН Украины, г. Харьков).

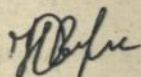
Ведущая организация - Киевский Государственный Университет
(г. Киев).

Защита состоится " I " декабря 1992 года в 15 часов на
заседании специализированного совета по защите диссертаций
Д.016.64.01 в ИРЭ АН Украины (310085, Харьков - 85,
ул. Проскуры, 12: актовй зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ИРЭ АН Украины.

Автореферат разослан 30 октября 1992 г.

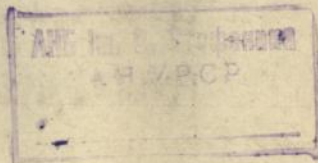
Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико - математических наук

 Д.К.Сиренко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816485 (W)



Общая характеристика работы.

I. Состояние вопроса. Формулировка проблемы. Актуальность темы.

Увеличение информационной емкости систем связи, разрешающей способности и точности радиолокационных систем, развитие спектроскопии и диагностики материалов привели к необходимости интенсивного освоения миллиметрового диапазона длин волн. Поскольку с увеличением частоты потери в металлических элементах закрытых систем резко возрастают, возникает необходимость перехода к открытым структурам. Основные особенности последних - уменьшение числа близких по частоте мод собственных колебаний, простота их возбуждения, например, диэлектрическим волноводом, наиболее удобной линии передачи электромагнитной энергии в этом диапазоне.

Одной из принципиальных задач физики твердого тела является создание физических основ приборостроения в миллиметровом диапазоне длин волн. Перспективными являются устройства со слоистыми и слоисто-периодическими структурами, дисковые и сферические резонаторы, изготовленные из диэлектриков, ферритов и полупроводников. Объемные и поверхностные волны, существующие в них, имеют различные частотные интервалы и дисперсионные характеристики, свое пространственное распределение полей. При создании устройств миллиметрового диапазона большое будущее перед поверхностными. Локализация в них электромагнитной энергии у границ раздела смежных сред приводит, в частности, к возможности проведения бесконтактной диагностики твердотельных образцов. Особый интерес вызывает также гибридные колебания ^ж, возникающие при появлении междупервой связи волн вблизи критических точек спектра ^{жж}.

ж Гуляев Ю.В., Зильберман П.Е. Новые типы безобменных спиновых волн на границе двух ферромагнетиков. // ФТТ.-1979.-Т.21, №.- С. 1549-1551.

жж Шестопапов В.П. Резонансные и междупервой колебания. // ДАН СССР.-1988.-Т.303, №.-С. 1131-1134.

Дисковые диэлектрические резонаторы, возбужденные на колебаниях " шепчущей галереи " - высокодобротные устройства миллиметрового диапазона ~~XXX~~, широко применяемые в фильтрах, для стабилизации частоты автогенераторов и измерения параметров материалов. Однако до настоящего времени теоретические работы были посвящены в основном рассмотрению спектральных характеристик только однородных изотропных диэлектрических дисковых резонаторов.

А к т у а л ь н о й п р о б л е м о й является, поэтому, исследование волновых явлений в неоднородных, анизотропных и гиротропных дисковых резонаторах, поверхностных и гибридных волн, возникающих вблизи критических точек спектра в них и в слоистых, слоисто-периодических структурах, содержащих гиротропный замагниченный слой, а также рассмотрение возможностей создания на их основе новых устройств миллиметрового диапазона.

2. Цель данной работы заключается в :

- исследовании влияния междутипового взаимодействия в области критических точек дисперсионного уравнения на спектральные характеристики и пространственное распределение полей в структурах, изготовленных из диэлектрических, ферритовых и полупроводниковых материалов;
- исследовании явлений, возникающих в гиротропных средах при возбуждении колебаний конечной амплитуды;
- изучении азимутальных колебаний в неоднородных, анизотропных, гиротропных дисковых и сферических резонаторах;
- рассмотрении возможностей использования результатов теоретического анализа при проектировании новых устройств миллиметрового диапазона.

Поставленная цель достигается путем исследований характеристик колебаний миллиметрового диапазона в слоистых, слоисто-периодических структурах, в неоднородных, анизотропных и гиротропных дисковых резонаторах.

~~гггг~~ Добромислов В.С., Взятышев В.Ф. Диэлектрические резонаторы с колебаниями " шепчущей галереи ". // Труды МЭИ.-М.- 1978.-вып. 360.-С. 25-30.

3. Теоретический анализ позволил впервые

- обнаружить новый тип гибридной волны, осуществляющей периодическую перекачку энергии между волнами различной поляризации в гиротропном слое, когда угол между внешним магнитным полем и направлением распространения близок к 90° ;
- исследовать междутиповое взаимодействие волноводной моды с поверхностным магнитоплазменом и спиновой волной, приводящей в области их фазового синхронизма к образованию гибридных волн, возникающую при этом периодическую перекачку энергии между диэлектрическим волноводом и гиротропным слоем;
- получить дисперсионное уравнение для волн, распространяющихся в структуре, состоящей из поперечно замагниченной гиротропной решетки и диэлектрического волновода с произвольным зазором между ними, рассмотреть новые типы гибридных волн, обнаружить области магнитных полей, в которых поверхностные волны не распространяются;
- изучить особенности расщепления вырожденных азимутальных колебаний однородного диэлектрического дискового резонатора при внесении в него неоднородности;
- обнаружить и исследовать пространственное разделение полей двух гибридных колебаний, возникающих при сближении двух одинаковых полудисков, расположенных на металлическом зеркале;
- получить аналитическое соотношение, связывающее поверхностный импеданс высокотемпературной металлооксидной пленки со спектральными параметрами резонатора;
- обнаружить новые типы собственных колебаний в резонаторе при анизотропии материала в плоскости диска;
- исследовать характеристики азимутальных поверхностных спиновых и магнитоплазменных колебаний, обладающих в аксиально-замагниченных дисковых гиротропных резонаторах более разреженным спектром по сравнению с колебаниями типа "шепчущей галереи".

4. Научная и практическая значимость работы.

Научная ценность диссертации состоит в исследовании фундаментальных особенностей взаимодействия поверхностных магнитоплазмен-

нов, спиновых и электромагнитных колебаний в твердотельных структурах.

Изученные в диссертационной работе эффекты позволяют:

- на основе измерений частотного сдвига и изменения добротности резонатора получить в миллиметровом диапазоне длин волн информацию о локальной комплексной диэлектрической проницаемости материалов в виде тонких пластин, о зависимости поверхностного импеданса и связанных с ним параметров высокотемпературных металлооксидных пленок от температуры;
- исследовать характерные особенности гибридных волн в рассматриваемых структурах.

Практическая ценность диссертационной работы заключается:

- в возможности создания на основе обнаруженных эффектов распределенных систем миллиметрового диапазона с новыми функциональными свойствами;
- в существенном улучшении амплитудно - частотных характеристик устройств миллиметрового диапазона путем возбуждения в аксиально-замагниченных дисковых гиротропных резонаторах поверхностных азимутальных магнитоплазменных и спиновых колебаний;
- в развитии нового аналитического метода вычисления отсутствующих в справочной литературе неопределенных интегралов, содержащих в подынтегральных выражениях специальные функции.

5. Обоснованность и достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций определяются

- использованием математических моделей, правильно описывающих исследуемые физические явления;
- переходом аналитических выражений в различных предельных случаях в соотношения, полученные иными методами в работах других авторов;
- наличием наглядной физической интерпретации возникающих явлений;
- экспериментальным подтверждением предсказанных в диссертационной работе эффектов.

6. Апробация и публикация результатов диссертации.

Материалы диссертации докладывались на:

Всесоюзном совещании " Проблемы интегральной электроники СВЧ " (Ленинград, 1984); IX международной конференции по инфракрасным и миллиметровым волнам (Япония, Тагасука, 1984); 4-ом Всесоюзном симпозиуме по миллиметровым и субмиллиметровым волнам (Харьков, 1984); совещании " Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости " (Свердловск, 1987); научно-технической конференции " Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем на ОИС " (Суздаль, 1989); научно-технической конференции " Актуальные проблемы технологии композиционных материалов и радиокомпонентов в микроэлектронных схемах " (Ялта, 1990); Всесоюзной научно-технической конференции " Неразрушающие методы контроля материалов " (Свердловск, 1990); 4-ом Всесоюзном семинаре по функциональной магнитоэлектронике (Красноярск, 1990); 12-ой научно-технической конференции " Твердотельная электроника " (Киев, 1990); 3-ей Всесоюзной школе-семинаре " Взаимодействие электромагнитных волн с твердым телом " (Саратов, 1991); 4-ой Всесоюзной научно-технической конференции " Моделирование и САПР радиоэлектронных и вычислительных систем СВЧ и КВЧ на объемных интегральных схемах " (Волгоград, 1991); I-ом Украинском симпозиуме " Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн " (Харьков, 1991).

Кроме того, результаты проведенных исследований вошли в научные отчеты по НИР " Теоретическое исследование высокочастотных свойств твердых тел " : " Спектр - IУ " (1985) и " Спектр - У " (1990).

Основное содержание диссертационной работы изложено в трех монографиях, 34 научных статьях и 15 тезисах докладов на научных конференциях. Получено авторское свидетельство на изобретение.

7. Структура и объем диссертации.

Работа состоит из предисловия, вводной главы, пяти результативных глав, математического приложения, перечисления основных результатов, 36 рисунков и 2 списков литературы (цитируемой и авторских публикаций). Объем диссертации составляет 247 стр., в том числе 217 стр. основного текста, 30 стр. списков литературы, состоящих из 207 наименований цитируемых источников и 53 авторских публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

В первой главе обоснована актуальность работы, оценена научная и практическая значимость изучения явлений, возникающих при возбуждении колебаний в ограниченных замагниченных твердотельных структурах. Приведена полная система дифференциальных уравнений и граничных условий, используемых в работе.

В первой части диссертации, содержащей 2 - 4 главы, рассмотрены характеристики волн, распространяющихся в замагниченных планарных слоистых структурах, неограниченных и однородных в одном из направлений. Двумерные модели позволили провести более полное аналитическое и численное исследование возникающих в них эффектов, рассмотреть возможность создания на их основе новых устройств миллиметрового диапазона.

Вторая глава посвящена исследованию слоистой структуры, состоящей из диэлектрического волновода и гиротропного слоя с воздушным зазором между ними [1 - 8]. Внешнее магнитное поле лежит в плоскости границ раздела и составляет угол Θ_0 с направлением распространения волн. Проведено аналитическое и численное исследование полученного в разделе 2.1 дисперсионного уравнения в различных предельных случаях.

На примере планарной структуры диэлектрический волновод-зазор-поперечно замагниченный полупроводник в разделе 2.2 продемонстрировано возникновение междутипового взаимодействия между волноводной модой и поверхностным магнитоплазмоном. Показано, что оно приводит к изменению добротностей волн и к появлению гибридного колебания, осуществляющего периодический обмен энергией между волноводом и полупроводником.

Волны TE ($H_y = 0$) и TM ($E_y = 0$) поляризаций в поперечном магнитном поле ($\Theta_0 = 90^\circ$) независимы. Здесь E_y и H_y - компоненты переменных полей в направлении внешнего магнитного поля. При малом отклонении последнего от $\Theta_0 = 90^\circ$ в области фазового синхронизма в гиротропном слое возникает междутиповое взаимодействие, приводящее к образованию гибридной волны, у которой

$$E_y \sim \cos(\delta_z z \cos \theta_0) \exp[i(\kappa_z z - \omega t)];$$

$$H_y \sim \sin(\delta_z z \cos \theta_0) \exp[i(\kappa_z z - \omega t)].$$

(I)

K_z здесь определяет постоянную распространения волн, параметр $\delta_z \cos \theta_0$, зависящий от направления и величины внешнего магнитного поля, диэлектрической и магнитной проницаемостей гиротропного слоя, характеризует возникающее при взаимодействии изменение постоянной распространения. Начало координат в (I) выбрано таким образом, чтобы при $z = 0$ поле волны было локализовано в ТЕ поляризации. Из (I) следует, что при

$$z_n = n \pi (\delta_z \cos \theta_0)^{-1}$$

поле сосредоточено в ТЕ волне, а при

$$z_n = (2n+1) \pi (2 \delta_z \cos \theta_0)^{-1}$$

в ТМ. Посредством возникшей гибридной волны осуществляется периодический обмен энергией между волнами различной поляризации. В разделе 2.3 это продемонстрировано на примере ферритового слоя.

Практический интерес представляют эффекты, возникающие при приближении к диэлектрическому волноводу ограниченных твердотельных структур. В разделе 2.4 исследовано влияние полупроводникового резонатора конечной длины L на характеристики моды, распространяющейся по диэлектрическому волноводу. При приближении к последнему в резонаторе на частоте, меньшей плазменной частоты носителей, возбуждается поверхностный плазмон. При зазоре порядка длины волны на частоте совпадения фазовых скоростей моды и плазмона возникает междутиповое взаимодействие, приводящее к образованию гибридной волны. Влияние второй стенки резонатора ($z = L$) приводит к появлению отраженной пространственно модулированной гибридной волны, приходящей на переднюю стенку ($z = 0$) с фазой, зависящей от длины резонатора. В результате интерференции возникает периодическая зависимость от длины L амплитуды отраженного в диэлектрическом волноводу сигнала [5] .

Третья глава посвящена исследованию структур, состоящих из периодически повторяющихся слоев различных гиротропных сред [6 - II] . Благодаря трансляционной симметрии колебания в них могут обладать характеристиками, принципиально не реализуемыми в обычных средах. Для структуры диэлектрический волновод-зазор-полугораничная гиротропная решетка в поперечном магнитном поле получено дисперсионное уравнение, справедливое при произвольных соотношениях между параметрами системы, частотой волны и напря-

женностью внешнего магнитного поля. Полученное соотношение аналитически и численно исследовано для решетки, период которой мал по сравнению с длиной волны. В 3.1 - 3.2 изучены медленные волны, зависимость их минимальной фазовой скорости от параметров решетки и напряженности внешнего магнитного поля. Обнаружена область магнитных полей, в которой поверхностные волны не существуют, а возникают объемные, распространяющиеся вглубь решетки. При зазоре между волноводом и решеткой порядка длины волны в вакууме при фазовом синхронизме волноводной моды и поверхностной волны в структуре возникает междутиповое взаимодействие, приводящее к образованию гибридной волны, осуществляющей периодический обмен энергией между волноводом и решеткой.

Распространению волн в изотропном диэлектрическом слоисто-периодическом волноводе конечной толщины посвящен раздел 3.3. Дисперсионное уравнение представлено в виде быстро сходящегося ряда по взаимодействующим пространственным гармоникам. Показано, что влияние периодичности приводит к появлению замедленных волн, поле которых почти однородно внутри и резко спадает вне волновода, фазовая же скорость существенно зависит от соотношения между периодом решетки и частотой.

Четвертая глава посвящена изучению влияния нелинейных эффектов на характеристики волн, распространяющихся в гиротропных средах [12 - 18]. Получено решение системы дифференциальных уравнений Максвелла и нелинейного уравнения Ландау - Лифшица для магнитного момента в наклонном магнитном поле. Показано, что в зависимости от величины амплитуды в феррите существуют волны двух типов: спиновые солитоны, являющиеся чисто нелинейным образованием, и периодические волны конечной амплитуды. Исследованы эффекты детектирования и зависимость скорости от амплитуды, влияние поперечной ограниченности структуры.

В разделе 4.2 рассмотрено возникновение продольных и поперечных волн на комбинационных частотах при нормальном падении нескольких волн круговой поляризации конечной амплитуды на полуграниченный ферромагнитный полупроводник, помещенный во внешнее магнитное поле, направленное по нормали к границе раздела. Обнаружено существенное увеличение коэффициентов Френеля вблизи плазменного, циклотронного и ферромагнитного резонансов.

Вторая часть диссертации посвящена изучению высокочастотных дисковых и сферических резонаторов. В пятой главе исследованы

характеристики резонансных колебаний с большими значениями азимутальных индексов n в неоднородных, анизотропных и гиротропных дисковых резонаторах, которое было проведено параллельно экспериментальным работам, выполненными в ИРЭ АН Украины [19-28].

Влияние неоднородности материала и поверхностного импеданса высокотемпературных металлооксидных пленок на резонансные частоты однородного изотропного диэлектрического резонатора было изучено при помощи интегрального уравнения

$$\begin{aligned}
 (\omega - \omega_q) \int_V (\vec{H}_q^* \vec{H} + \epsilon(z) \vec{E}_q^* \vec{E}) dV = \\
 = \omega \int_V [\epsilon(z) - \tilde{\epsilon}(\vec{z})] \vec{E}_q^* \vec{E} dV + \\
 + i \int_S \vec{z} [\vec{v} [\vec{v} \vec{H}]] \vec{H}_q^* dS
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь \vec{E}_q , \vec{H}_q и ω_q - известные поля и частоты q -го резонансного колебания однородного резонатора; \vec{E} , \vec{H} и ω - неоднородного; $\epsilon(z)$ и $\tilde{\epsilon}(\vec{z})$ - соответственно их диэлектрические проницаемости. Вне резонатора $\epsilon(z) = \tilde{\epsilon}(\vec{z}) = 1$. Интегрирование в (2) ведется по всему пространству.

В однородных изотропных дисковых резонаторах собственные колебания, у которых азимутальные компоненты переменного магнитного поля зависят от азимутальной координаты φ как $\cos n\varphi$ (симметричный тип) и $\sin n\varphi$ (несимметричный), вырождены по частоте. Влияние азимутальной неоднородности приводит к их расщеплению. На примере колебания EH_q поляризации, в частности, показано, что частоты резонатора с неоднородностью в виде двух одинаковых радиальных разрезов, разнесенных друг относительно друга на угол φ_0 , равны

$$\omega_{\pm} = \omega_q [1 + \eta_{\pm} \pm \eta_2 \cos^2 n\varphi_0], \tag{3}$$

Здесь η_1 и η_2 зависят от параметров резонатора и величины зазора, знак плюс (минус) относится к симметричным (несимметричным) колебаниям. Из этого выражения следует, что при $\varphi_0 = 90^\circ$

частотное вырождение сохраняется для колебаний с нечетными азимутальными индексами. Это объясняется одинаковым, но раздельным влиянием разрезов на противофазные колебания однородного резонатора. Получено хорошее согласие полученных теоретических результатов с проведенными в диапазоне частот 39 - 45 ГГц экспериментальными измерениями спектральных параметров дискового диэлектрического резонатора с одним и двумя радиальными разрезами. Обнаруженный эффект может быть применен для исследования в миллиметровом диапазоне локальной комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрических и полупроводниковых образцов в виде тонких пластин, вставляемых в один из разрезов, а также для резонансной модуляции мощности в возбуждающем диэлектрическом волноводе [20] .

Влияние радиальной неоднородности, рассмотренное в разделе 5.2, приводит вблизи критической частоты спектра к появлению междутипового взаимодействия между резонансными колебаниями, характеризующимися смежными значениями радиальных индексов. Проведенное исследование показало, что радиально-слоистый резонатор может быть также использован для измерения диэлектрической проницаемости.

Уравнение (2) было применено в работе для нахождения связи между спектральными параметрами диэлектрического волновода и поверхностным импедансом металлооксидной пленки, возмущающей его. Полученное аналитическое соотношение позволило по экспериментальным значениям смещений частоты и изменений добротности исследовать температурную зависимость параметров высокотемпературных металлооксидных пленок.

Сближение двух одинаковых диэлектрических полудисковых резонаторов, установленных на металлическом зеркале, приводит к возникновению в структуре независимых симметричных и несимметричных колебаний. При определенной величине зазора наблюдается совпадение их частот на смежных значениях азимутальных индексов. Как показано в разделе 5.5, влияние неоднородности (например, возникающей в эксперименте малой непараллельности торцевых стенок резонатора) приводит к расщеплению колебаний на два гибридных колебания с близкими частотами, пространственно-промодулированные ортогональными огибающими. Они и описывают обнаруженный в эксперименте эффект пространственного расщепления полей. Он может быть использован для осуществления в миллиметровом диапазоне простран-

ственного разделения полей двух колебаний с близкими частотами [24].

Высококачественные диэлектрики, применяемые при изготовлении высокочастотных диэлектрических резонаторов, являются монокристаллическими средами, которым свойственна анизотропия. Влияние ее на резонансные частоты ранее учитывалась для таких резонаторов, геометрическая ось которых совпадала с осью анизотропии материала. В разделе 5.6 показано, что в анизотропном резонаторе с осью анизотропии, лежащей в плоскости поперечного сечения, появляются новые типы колебаний. Сравнение полученных результатов с экспериментальными измерениями показало их хорошее совпадение [25 - 26].

В разделе 5.7 показано, что в дисковом аксиально-замагниченном гиротропном резонаторе при определенных соотношениях между частотой, напряженностью внешнего магнитного поля и параметров резонатора возникают поверхностные азимутальные колебания: магнитоплазмоны - в полупроводниковом, спиновые - в ферритовом. Разреженность их спектров по сравнению с колебаниями типа "шепчущей галереи" значительно улучшает амплитудно-частотные характеристики перестраиваемых фильтров миллиметрового диапазона. Частоты этих поверхностных колебаний существенно зависят от направления внешнего магнитного поля, что может быть использовано при конструировании невзаимных устройств.

Шестая глава посвящена рассмотрению собственных колебаний в радиально-слоистых сферических резонаторах. Показано, что наличие полупроводникового слоя приводит к возникновению на частотах ниже плазменной частоты носителей поверхностных плазмонов. По сравнению с "шепчущей галереей" последние обладают более разреженным спектром. Эти колебания вырождены по частоте с кратностью $2n + 1$, где n - полярный индекс. Введение неоднородности в резонатор снимает это вырождение. На примере сверхнизкочастотных колебаний в полости Земля-ионосфера показано, что влияние внешнего магнитного поля также приводит к появлению расщепления вырожденных колебаний. Это может быть использовано для создания гребенки близких частот с легко управляемым расстоянием между ними [29 - 33].

В приложении изложен разработанный автором метод вычисления неопределенных интегралов, содержащих в подынтегральных выражениях высшие трансцендентные функции. Используя функциональные соотношения

ношения между этими функциями и их производными, удается получить рекуррентные соотношения между интегралами. Проведенное исследование образующей цепочки позволило вычислить большое количество массивов интегралов, отсутствующих в справочной литературе [34 - 35].

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Впервые обнаружены и исследованы новые типы гибридных волн в ферритовом и полупроводниковом слоях, появляющихся при междутиповом взаимодействии в области фазового синхронизма ТЕ и ТМ волн, когда угол между внешним магнитным полем и направлением распространения волн близок к 90° . Возникающий при этом периодический обмен энергией между волнами различной поляризации может быть положен в основу действия ряда интегральных устройств.
2. Изучено междутиповое взаимодействие волноводной моды с поверхностными магнитоплазмонной и спиновой волной, приводящее в области фазового синхронизма к образованию гибридной волны. Периодический обмен энергией между диэлектрическим волноводом и гиротропным слоем, осуществляемый этой волной, может послужить основой для создания перестраиваемых фильтров, управляемых внешним магнитным полем.
3. Проведено исследование периодической зависимости амплитуды отраженного сигнала в диэлектрическом волноводе от длины полупроводникового резонатора волноводной моды и поверхностного плазмона, возникающего при приближении резонатора к волноводу. Результаты могут быть использованы при конструировании фильтров в схемах миллиметрового диапазона.
4. Получено дисперсионное уравнение для волн в структуре диэлектрический волновод-зазор-поперечно замагниченная полуограниченная гиротропная решетка, справедливое при произвольных соотношениях между параметрами решетки, частотой волны и напряженностью внешнего магнитного поля. Проведено аналитическое и численное исследование его в "мелкослоистом приближении", когда длина волны значительно превышает ее период. В решетке, содержащей диэлектрический слой, обнаружена зависящая от толщины последнего область магнитных полей, в которой поверхностные волны не существуют.

Изучен новый тип гибридной волны, возникающей в области фазового синхронизма волноводной моды и поверхностного магнитоплазмона. Появляющаяся при этом периодическая перекачка энергии между волноводом и решеткой может быть использована для возбуждения последней.

5. Исследованы характеристики волн конечной амплитуды, распространяющихся в феррите в наклонном магнитном поле. Показано, что в зависимости от величины амплитуды в среде возникают спиновые солитоны либо стационарные периодические волны. Изучены эффекты детектирования и зависимость скорости от амплитуды, влияние поперечной ограниченности структуры. Рассмотрено взаимодействие волн круговой поляризации конечной амплитуды, падающих вдоль магнитного поля нормально на полуограниченный ферромагнитный полупроводник. Обнаружено значительное увеличение амплитуд отраженных волн на основных и комбинационных частотах вблизи плазменного, циклотронного и ферромагнитного резонансов.

6. Изучены особенности расщепления вырожденных колебаний однородного диэлектрического дискового резонатора, возникающие при внесении азимутальной неоднородности в виде нескольких радиальных щелей. Предложено устройство для локального определения комплексной диэлектрической проницаемости тонких диэлектрических либо полупроводниковых пластин, на которое получено авторское свидетельство [21].

7. Аналитическое соотношение, связывающее резонансные частоты дискового резонатора с импедансом высокотемпературных металлооксидных образцов, позволяет по экспериментальным измерениям сдвиги частот и изменения добротности исследовать температурную зависимость поверхностного импеданса и связанных с ним параметров образца в миллиметровом диапазоне.

8. Обнаружены новые типы волн в анизотропных дисковых резонаторах, изготовленных из материалов, ось анизотропии которых лежит в плоскости диска. Их спектральные характеристики могут быть использованы для определения компонент тензора диэлектрической проницаемости.

9. Обнаружены и исследованы характеристики поверхностных азимутальных колебаний в дисковых полупроводниковом и ферритовом резонаторах. Они обладают более разреженным спектром по сравнению с колебаниями "шепчущей галереи". Это позволяет существенно

улучшить амплитудно-частотные характеристики приборов миллиметрового диапазона. Зависимость частоты от направления внешнего магнитного поля может быть использована при создании невзаимных устройств.

Ю. Показано, что при сближении двух одинаковых диэлектрических полудисковых резонаторов, установленных на металлическом зеркале, при определенной величине зазора возникает вырождение по частоте симметричных и несимметричных колебаний со смежными значениями азимутальных индексов. Влияние неоднородности приводит к появлению междутипового взаимодействия и к возникновению пространственного разделения гибридных колебаний с близкими частотами. Обнаруженный эффект может быть использован для пространственного разделения полей колебаний, близких по частоте. На предложенное устройство получено положительное решение.

II. Для неопределенных интегралов, содержащих в подынтегральных выражениях высшие трансцендентные функции, развит аналитический метод, позволяющий вычислить большое количество массивов интегралов, отсутствующих в справочной литературе [35].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Филиппов Ю.Ф., Яковенко В.М. О взаимодействии поверхностных плазменных волн в полупроводнике с модами диэлектрического волновода. // ЖТФ.-1987.-Т.57, №6.-С.1206-1207.
2. Бирюкова Н.В., Смирнова Т.А., Филиппов Ю.Ф. Взаимодействие поверхностных волн с волноводными модами прямоугольного волновода, нагруженного диэлектрическим и ферритовым слоями. // Сб. "Научное приборостроение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах".-Харьков: ИРЭ АН УССР.-1988.-С.54-63.
3. Колпаков С.Н., Филиппов Ю.Ф. О взаимодействии магнитоплазменных волн полупроводникового волновода с модами диэлектрического волновода. // Изв.вузов.Радиофизика.-1989.-Т.32, №12.-С.1568-1570.
4. Белоус Р.И., Филиппов Ю.Ф. Резонансное взаимодействие электромагнитных колебаний в слоистом резонаторе. // Изв.вузов.Радиоэлектроника.-1989.-Т.32, №5.-С.85-86.
5. Филиппов Ю.Ф., Яковенко В.М. Взаимодействие волноводных мод и поверхностных поляритонов в структуре планарный диэлектрический

волновод-полупроводник. // Изв. вузов. Физика. - 1989. - Т. 32, №1. - С. 78-83.

6. Булгаков А.А., Филиппов Д.Ф. Влияние затухания на дисперсионные свойства сверхрешетки в магнитном поле. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1985. - Т. 28, №9. - С. 1185-1192.

7. Филиппов Д.Ф. Взаимодействие поверхностных магнитоплазменных волн с волноводными модами в структуре полупроводниковая решетка-зазор-диэлектрический волновод. // Труды Всесоюзной школы семинара. - Саратов. - 1991. - С. 31-37.

8. Филиппов Д.Ф., Яковенко В.М. Электромагнитные волны в слоисто-периодическом диэлектрическом волноводе. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1988. - Т. 31, №4. - С. 167.

9. Филиппов Д.Ф. К теории распространения электромагнитных волн в планарном слоисто-периодическом диэлектрическом волноводе. // Сб. "Твердотельные генераторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов" - Харьков: ИРЭ АН УССР. - 1988. - С. 15-24.

10. Филиппов Д.Ф., Яковенко В.М. Резонансное взаимодействие пучковых волн с волноводными модами решетки конечной толщины. // Сб. "Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов". - Киев: Наукова думка. - 1988. - С. 167-172.

11. Булгаков А.А., Филиппов Д.Ф. К теории прохождения электронного пучка над мелкослойистой средой. // Украинский физический журнал. - 1984. - Т. 29, №3. - С. 369-374.

12. Филиппов Д.Ф. К теории распространения стационарных волн конечной амплитуды в ферритах. // Изв. вузов. Радиофизика. - 1965. - Т. 8, №2. - С. 292-300.

13. Филиппов Д.Ф. К теории стационарных волн конечной амплитуды в замедляющей системе. // ЖПМТФ. - 1966. - №2. - С. 113-116.

14. Филиппов Д.Ф. О звуковых волнах конечной амплитуды в ограниченной плазме. // ФТТ. - 1973. - Т. 16, №10. - С. 2282-2287.

15. Филиппов Д.Ф. Взаимодействие волн в ограниченной плазме. // ФТТ. - 1973. - Т. 16, №7. - С. 2060-2065.

16. Филиппов Д.Ф. К теории распространения Н волны конечной амплитуды в круглом ферритовом волноводе. // Изв. вузов. радиофизика. - 1969. - Т. 12, №4. - С. 953-956.

17. Филиппов Д.Ф. Отражение электромагнитных волн конечной амплитуды от полупроводниковой плазмы. // ЖТФ. - 1974. - Т. 44, №5. - С. 950-955.

18. Филиппов Д.Ф. О взаимодействии волн в ферромагнитном полупроводнике. // ФТТ. - 1974. - Т. 16, №5. - С. 965-968.

19. Еременко З.Е., Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Открытый слоистый диэлектрический резонатор с азимутальными колебаниями. // ДАН УССР.-Сер.А.-1991.-№6.-С. 62-65.
20. Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Распределенное взаимодействие колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах. // Изв.вузов. Радиофизика.-1990.-Т.33,№11.-С. 1304-1308.
21. Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Устройство для определения комплексной диэлектрической проницаемости на СВЧ. // А.С. № 16226136.-Б.И.-1991.-№5.-С.121.
22. Кириченко А.Я., Солодовник В.А., Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Неоднородные открытые диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями для исследования и неразрушающего контроля материалов. // Сб. " Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов"- Харьков: ИРЭ АН УССР.-1990.-С. 69-75.
23. Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Квазиоптический зеркальный диэлектрический резонатор. // Сб. " Квазиоптическая техника миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов длин волн".- Харьков: ИРЭ АН УССР.-1989.-С. 28-34.
24. Филиппов Ю.Ф., Харьковский С.Н. Распределенное взаимодействие колебаний в квазиоптических диэлектрических резонаторах. // Письма в ЖТФ.-1990.-Т.16,№20.-С.24-28.
25. Кириченко А.Я., Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Черпак Н.Т. Аксиально-однородные азимутальные колебания в анизотропных диэлектрических резонаторах. // РЭ.-1989.-Т.33,№2.-С. 300-304.
26. Еременко З.Е., Филиппов Ю.Ф. Электромагнитные колебания в дисковых диэлектрических резонаторах с осью анизотропии, лежащей в плоскости поперечного сечения. // РЭ.-1991.-Т.36,№4.-С. 813-817.
27. Прокопенко Ю.В., Филиппов Ю.Ф., Яковенко В.М. Квазиазимутальные поверхностные колебания в круглых полупроводниковых резонаторах. // ДАН УССР.-Сер.А.- 1988.-№4.-С.59-61.
28. Литвиненко Г.В. Филиппов Ю.Ф. Азимутальные поверхностные спиновые колебания в ферритовых дисковых резонаторах. // ДАН УССР.-Сер. А.-1990.-№4.-С. 28-34.
29. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф. Суточные вариации собственных частот резонатора Земля-ионосфера в связи с эксцентриситетом геомагнитного поля. // Геомагнетизм и аэрономия.-1968.-Т.8,№2.-С.250-260.

30. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Д.Ф. Влияние геомагнитного поля на спектр низкочастотных шумов в резонаторе Земля - ионосфера. // Украинский физический журнал.-1969.-Т.14, №3.-С. 609-612.
31. Bliokh P.V., Nikolaenko A.P., Filipov Ju.F. Ehitation of the Earth - ionosphere wave - guide by lyghting discharge and ihe influence of geomagnetic field of ELF Noise spectrum. // Alta Frequencia.-1969.-V.3/4.-L. 189.
32. Блюх П.В., Николаенко А.П., Филиппов Д.Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля - ионосфера.- Киев: Наукова думка.-1977.-200с.
33. Bliokh P.V., Nikolaenko A.P., Filipov Ju. F. Shuman reso-nances in the Earth - Ionosphere.-London: Peter Peregrinus LTD -1980.-200 p.
34. Филиппов Д.Ф. О вычислении неопределенных интегралов, содержащих некоторые трансцендентные функции. // ДАН УССР.- Сер. А.-1979.-№3.-С.176-179.
35. Филиппов Д.Ф. Таблицы неопределенных интегралов от высших трансцендентных функций.- Харьков: Вища школа.-1981.-100 с.

№ 25.930
Ав 25.930

Подп. в печать 26.10.92. Формат 60х90
Бум. офс. Усл.-печ.л. 1.2.
Тираж 100 экз. Заказ 114. Бесплатно.

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