

УДК 621.317.37

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ

А. А. Вертий, В. Н. Деркач, В. П. Шестопалов

Проведен анализ структуры электромагнитных полей вырожденных колебаний двухзеркального открытого резонатора (ОР) с помощью метода радиоструктурного анализа. Показано, что наличие возмущающих поле ОР факторов приводит к неполному вырождению и в результате — к уширению резонансной кривой моды. Обсуждается вопрос применения системы связанных ОР для контроля диэлектрических параметров радио-прозрачных материалов.

Изучение высокочастотных полей, как правило, с достаточной эффективностью проводится с привлечением различных возмущающих и излучающих зондов [1, 2]. При этом обеспечивается получение полной информации о поле. Однако эти методы имеют один существенный недостаток. Они перестают работать в случае вырожденных мод. В некоторых ситуациях эту трудность удается обойти путем применения сложных фазовых фильтров [3, 4], однако зачастую доступ к анализируемому полю ограничен, что не позволяет применить такой подход. Кроме того, желательно уменьшить время получения информации о состоянии резонансного поля. Альтернативой упомянутым подходам может служить метод пространственных спектров, описанный в [5]. Суть применения этого метода для анализа резонансных волновых пучков состоит в следующем. ОР-анализатор связывается с исследуемым резонатором посредством частично-прозрачного зеркала с высоким значением коэффициента отражения.

В отличие от теоретических рассмотрений, приведенных в работах [6, 7], будем предполагать, что влияние второго (со стороны источника мощности) резонатора на характеристики первого пренебрежимо мало, т. е. считается, и это проверено рядом экспериментов, что анализ поля первого резонатора проводится практически без его возмущения. В случае согласования пучков в резонаторе-анализаторе в пределах рабочего участка спектра возбуждается только одна мода, соответствующая по структуре падающему пучку, а нарушение структуры падающего пучка, как-то: деформация, перекос осей и т. д., приводит к рассогласованию пучков и появлению в спектре резонатора-анализатора набора мод. Анализ параметров (амплитуды и фазы резонансного коэффициента передачи) этого набора мод позволяет определять характер возмущения падающего пучка. Аналогично можно возбуждать резонатор-анализатор рассогласованным пучком и проводить анализ его деформации. Наиболее чувствительным ко всякого рода возмущениям является поле вырожденных типов волн, т. е. поле взаимодействующих колебаний. Это связано с тем, что вырожденное состояние резонансного колебания нестабильно, и малое нарушение симметрии резонатора, структуры поверхности зеркал или среды, заполняющей объем резонатора, приводит к снятию вырождения. В случае слабого возмущения поля вырожденной моды, когда сдвиги резонансных частот мод, участвующих в вырождении, происходят в пределах резонансной

кривой и их трудно зарегистрировать, целесообразно анализировать структуру пучка с помощью резонатора-анализатора. При этом небольшие изменения структуры поля взаимодействующих колебаний приводят к значительным изменениям регистрируемых амплитуд и фаз коэффициентов передачи набора мод анализатора.

1. Методика эксперимента. Схема экспериментальной установки, на которой проводились исследования, приведена на рис. 1. Резонансные колебания в первом резонаторе (OP_1) (который будем называть задающим резонатором) возбуждались посредством щели связи в центре сферического отражателя. Настройка резонатора в резонанс и анализ типов волн в нем выполнялись в режиме «на отражение». Резонансные колебания регистрировались как «отсос» мощности резонатора, и минимальное значение коэффициента отражения соответствовало максимальному коэффициенту передачи резонатора. В качестве анализатора поля использовался полусимметричный открытый резонатор с частично-прозрачным плоским входным отражателем и сплошным металлическим сферическим (астигматическим) зеркалом с элементом связи в виде волноводной щели в центре. Входное зеркало резонатора-анализатора, оно же промежуточное зеркало, было выполнено в виде алюминированной лавсановой пленки с высоким коэффициентом отражения ($R=98,7\%$), в специальной кольцевой обойме.

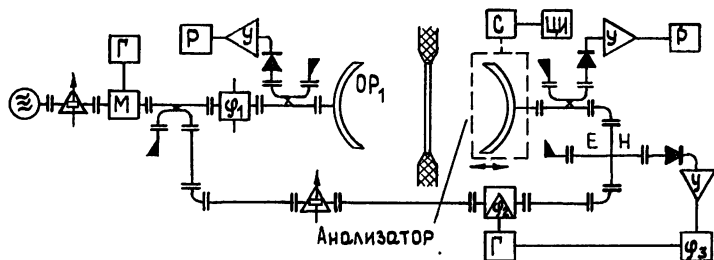


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: Г — низкочастотный генератор, М — полупроводниковый амплитудный модулятор, У — усилитель, Р — регистрирующее устройство, С — механизм перемещения зеркала, ЦИ — цифровой индикатор линейных перемещений, Φ_1 — фазовращатель, Φ_2 — фазовый модулятор, Φ_3 — низкочастотный фазометр.

Применение тонкой ($h=20$ мкм) лавсановой пленки позволило пренебречь трансформацией пучка в диэлектрическом слое конечной толщины. Радиус кривизны сферического зеркала составлял $R \approx 30\lambda$, астигматического — $R_x \approx 30\lambda$, $R_y \approx 32\lambda$; апертуры зеркал — $2d \approx 30\lambda$. Измерения проводились в двухмиллиметровом диапазоне волн. Измерение амплитудно-фазового спектра резонатора-анализатора выполнялось при сканировании сферического (астигматического) зеркала с помощью устройства перемещения (С) с цифровой индикацией (ЦИ) вдоль оси системы в пределах $\lambda/2$ [°]. При этом в резонаторе последовательно возбуждался набор собственных типов волн (мод) с комплексными коэффициентами передачи, зависящими от структуры возбуждающего поля. Амплитудно-модулированный сигнал с выхода анализатора поступал через волновой ответвитель в систему измерения амплитудного и фазового спектров. После детектирования и усиления сигнал, пропорциональный коэффициенту передачи резонатора по мощности, регистрировался на экране осциллографа или ленте скоростного самописца в виде последовательности резонансных пиков с амплитудами, определяющими амплитудный спектр.

Измерение относительных значений фаз резонансных коэффициентов передачи высших мод по сравнению с фазой основной моды осуществлялось посредством двухканальной схемы с введением фазомо-

дулированной опорной волны и выделением на двойном волноводном мосте амплитудно-модулированного (с частотой, равной частоте фазовой модуляции) высокочастотного сигнала.

Начальная фаза низкочастотной огибающей, пропорциональная фазе резонансного коэффициента передачи φ_{lp}^0 , регистрируется с помощью низкочастотного фазометра (φ_3). Наборы значений амплитуд A_{lp} и фаз φ_{lp} резонансного коэффициента передачи образуют амплитудно-фазовый спектр, однозначно характеризующий возбуждающее поле [5].

Проведем анализ вырожденных мод полусимметричного резонатора. Как показано в [3], в таком ОР существует две области вырождения мод: с четными радиальными индексами (соответствует полуконфокальной геометрии ОР при $L=R/2$) и с нечетными индексами (при $L=R/2+\lambda/4$). Согласно анализу энергетических соотношений [10, 11], моды конфокального ОР должны иметь минимальные радиационные потери и как следствие — высокую добротность. Однако экспериментальные результаты свидетельствуют о существенном уменьшении добротности вырожденных мод в конфокальном ОР. Причины несоответствия теории и эксперимента заключаются в пренебрежении абберационными поправками, вносимыми неидеальным изготовлением зеркал, неизбежными на практике (например дефекты и отклонение сферической поверхности от идеальной), взаимным перекосом зеркал и т. д. Учет первой абберационной поправки для основной моды [12] и величины параболического и эллиптического астигматизма зеркал [13] уменьшает указанное несоответствие. Таким образом, в реальном многомодовом резонаторе конфокальной (или полуконфокальной) геометрии, обладающем суммарными потерями, отличными от нуля, центральные частоты вырождающихся колебаний не совпадают, при этом происходит уширение резонансной кривой и существенное уменьшение добротности колебаний. В исследуемом ОР при $R \approx 30\lambda$, $2d \approx 30\lambda$ и добротностях низших мод вблизи области вырождения $Q \approx 15 \div 18$ тыс., добротность вырожденной моды с четными индексами $Q_{02k} \approx 3$ тыс., с нечетными — $Q_{02k+1} \approx 2 \div 3$ тыс. ($k=0, 1, 2, \dots$). Перестраивая исследуемый резонатор в пределах резонансной кривой вырожденной моды и регистрируя параметры спектра резонатора-анализатора, можно определить характер взаимодействия мод, построить амплитудно-фазовый рельеф поля вырожденной моды в разных сечениях резонансной кривой, а также выделить резонансные кривые отдельных мод в пределах суммарной уширенной кривой.

Следует заметить, что существенным фактором при проведении подобных экспериментов является использование высокостабильных источников миллиметровых волн — ГДИ [14].

2. Обсуждение результатов. На рис. 2а приведен график резонансной кривой, вырожденной по четным индексам моды при изменении резонансного расстояния L , кривая уширена и по форме отличается от лоренцевой. На рис. 2б, в, г приведены примеры спектров амплитуд резонансного коэффициента передачи мод резонатора-анализатора при трех положениях промежуточного зеркала в пределах резонансной кривой (на рис. 2а эти сечения выделены пунктирными прямыми). Приведенные сечения (б, в, г) соответствуют максимумам разрешенных резонансных кривых мод TEM_{02q} , TEM_{00q} , TEM_{06q} соответственно (рис. 2д). Суммарная резонансная кривая вырожденной моды может быть получена сложением резонансных кривых отдельных мод с учетом того факта, что фазы соседних взаимодействующих колебаний отличаются на π . Распределение поля в поперечном сечении вырожденной моды обладает сложной структурой и непостоянно в разных сечениях резонатора.

В эксперименте поле вырожденного колебания регистрировалось при сканировании открытым концом волновода за частично-прозрачным зеркалом. Распределение интенсивности поля в поперечном сечении, соответствующее случаю (г) рис. 2а, в зависимости от безразмерного параметра x/w , где x — поперечная координата, w — радиус пучка в плоскости анализа, приведено на рис. 2е сплошной кривой. Пунктирная кривая соответствует распределению интенсивности поля, восстановленного на ЭВМ по полученным амплитудным и фазовым спектрам анализатора. Случай вырождения мод с нечетными индексами рассмотрен на рис. 2ж, з, где (ж) — распределение поля в поперечном сечении в максимуме резонансной кривой. В таблице приведены значения амплитуд и фаз резонансного коэффициента передачи для двух рассмотренных случаев (г, з). Значения фаз приведены относительно фазы основной моды.

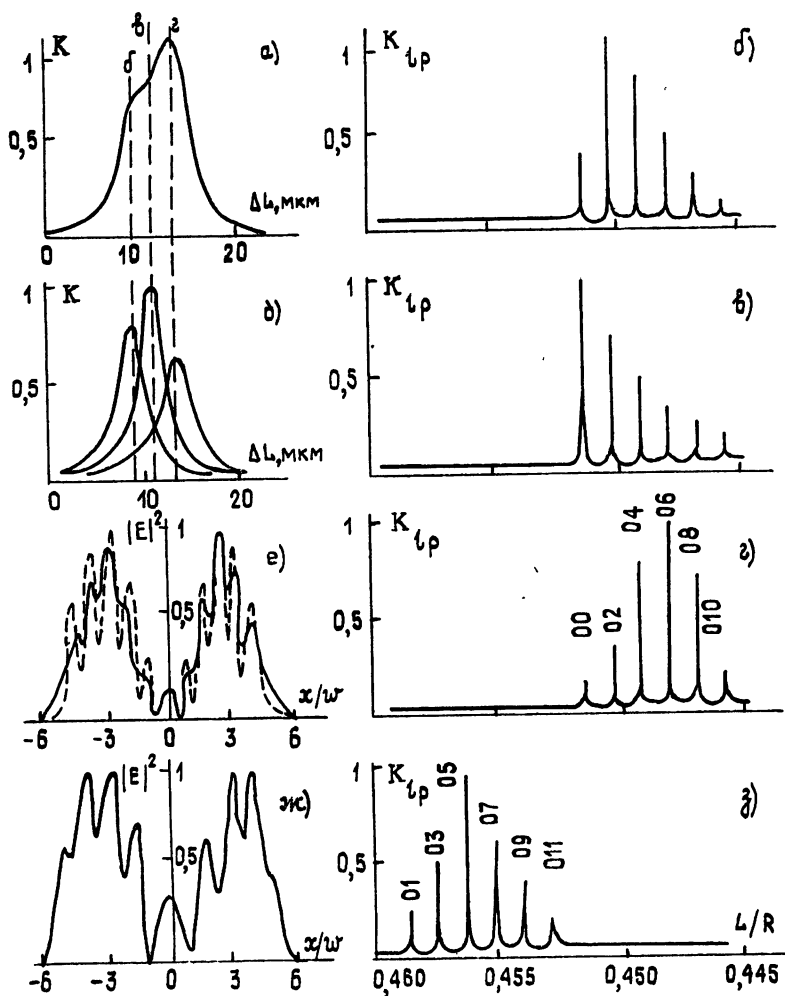


Рис. 2.

В случае совпадения резонансных частот взаимодействующих мод фазы коэффициентов передачи одинаковы у мод в группах. Это значит, что с учетом аппаратной функции анализатора поля мод в плоскости выходного зеркала противофазны, с этим, в частности, связано

уменьшение уровня амплитуды резонансного коэффициента передачи мод в конфокальном резонаторе. Неравенство фаз, полученных в эксперименте, связано с несовпадением резонансных частот мод.

Нестабильность вырожденной моды задающего ОР и высокая чувствительность к локальным возмущениям позволяет использовать такой резонатор в схемах обнаружения слабых неоднородностей. При этом регистрация амплитуд и фаз компонент спектра резонатора-анализатора дает возможность выполнять экспресс-анализ образцов с неоднородностью свойств, т. е. проводить отбраковку образцов и выявлять эту неоднородность при вычитании восстановленных полей: эталонного и возмущенного.

Таблица 1

TEM_{lpq}	00	02	04	06	08	010	01	03	05	07	09	011
$A_{lp} (-\text{дБ})$	12	5,8	1,0	0	1,5	10	6,2	3,0	0	2,2	4,3	11,8
φ_{lp}°	0	51	62	72	87	92	163	148	172	185	203	208

Применение астигматического резонатора-анализатора [15] позволяет проводить анализ в классе функций Эрмита—Гаусса и за счет снятия вырождения аксиально-симметричных мод существенно повысить число членов разложения. Анализ структуры высших мод задающего резонатора при разных значениях продольного индекса q позволил определить диапазон расстояний между зеркалами, в пределах которого распределения полей этих мод соответствуют функциям Лагерра—Гаусса, и установить существенное влияние конечной аксиальной апертуры зеркал на структуру мод при больших L/R . На рис. 3 приведены огибающие нормированных (на k_{08} при $L/R=0,38$) коэффициентов передачи (K_{mn}) мод цилиндрической геометрии TEM_{mnq} при анализе аксиально-симметричной моды TEM_{04q} . Поскольку каждая из аксиально-симметричных мод TEM_{lpq} является линейной комбинацией четных мод TEM_{mnq} при $m+n=l+2p$ [3] (в данном случае $l=0$,

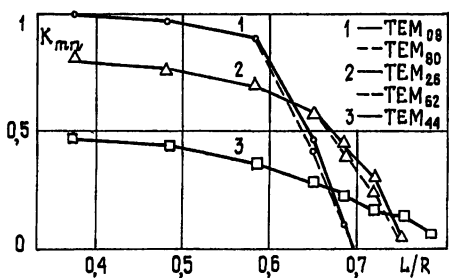


Рис. 3.

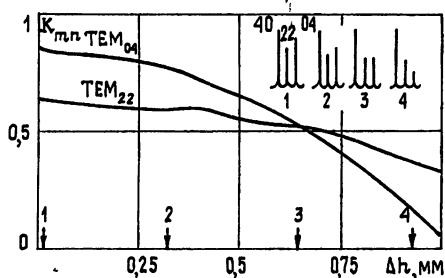


Рис. 4.

$p=4$, m и n приведены на рис. 3) с отличающимися коэффициентами при модах с $m_i \neq n_j$, $m_j \neq n_i$, то разная скорость убывания кривых в случае $L/R > 0,58$ иллюстрирует изменение значений коэффициентов, что в свою очередь приводит к изменению структуры моды. В пределах $L/R=0,38 \div 0,58$ коэффициенты неизменны, структура мод с достаточным приближением описывается функциями Лагерра—Гаусса. Кроме того, равенство коэффициентов передачи мод с $m_i = n_j$ и $m_j = n_i$ на участке спектра $L/R=0,38 \div 0,58$ позволяет сделать вывод о хорошей юстировке задающего ОР. Восстановление полей по полученным спект-

рам проводилось с учетом небольшого различия радиусов пучка в астигматическом ОР в ортогональных направлениях ($\omega_x=4,6$ мм, $\omega_y=4,74$ мм).

Работу устройства на связанных резонаторах можно продемонстрировать на следующем примере. В задающий резонатор, настроенный на один из аксиально-симметричных мод (TEM_{02q}) вносится тонкая ($h=9$ мкм) лавсановая пленка ($\epsilon=3,2$), изготовленная в виде клина с изменением ширины на 1 мм в пределах 160 мм длины. Пленка протягивается через объем резонатора параллельно плоскому зеркалу на расстоянии $\lambda/4$ от него. В астигматическом резонаторе-анализаторе регистрируются амплитуды коэффициентов передачи четных мод цилиндрической геометрии (TEM_{40q} , TEM_{22q} , TEM_{04q}). По мере изменения ширины участка пленки, находящегося в поле резонатора, изменяются амплитуды компонент спектрального набора. Огибающие коэффициентов передачи указанных мод в зависимости от ширины пленки в пределах клиновидного участка приведены на рис. 4. Мода TEM_{40q} не возмущается, среднее по длине пленки изменение K_{22q} составляет $\Delta K_{22q} = 1,8$ дБ/мм, $\Delta K_{04q} = 9,6$ дБ/мм. Волнистый характер огибающих связан с изменением толщины пленки в пределах 1 мкм. В данном случае основным параметром, возмущающим поле задающего резонатора, является изменение ширины пленки. В случае постоянной ширины по измерению коэффициента передачи можно контролировать неоднородность толщины или разнородность материала. Высокая чувствительность схемы связанных резонаторов в совокупности с анализом вырожденной моды позволит применить ее при контроле параметров тонких диэлектрических волокон в случае, когда возмущение столь мало, что не может быть зарегистрировано по сдвигу резонансных частот и изменению добротности колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валитов Р. А. и др. Техника субмиллиметровых волн.— М.: Сов. радио, 1969.
2. Иванченко И. В. Диссертация.— Харьков, 1980, 235 с.
3. Вертий А. А., Деркач В. Н., Красюк В. Б., Шестопапов В. П.— Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 21, № 1, с. 73.
4. Вертий А. А., Деркач В. Н., Красюк В. Б., Шестопапов В. П.— Радиотехника и электроника, 1981, 26, № 10, с. 2017.
5. Вертий А. А., Деркач В. Н., Шестопапов В. П.— ДАН УССР, сер. А, 1978, № 3, с. 247.
6. Авербах В. С.— Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 5, с. 777.
7. Авербах В. С., Власов С. Н., Пискунова Л. В.— Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 8, с. 981.
8. Пархомов Н. С., Валитов Р. А.— Радиотехника и электроника, 1969, 14, № 1, с. 36.
9. Вертий А. А., Деркач В. Н. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по голографии.— Л.: 1978, с. 396.
10. Рамм А. Г.— Опт. и спектр., 1976, 40, № 1, с. 160.
11. Бойцов В. Ф., Фрадкин Э. Е.— Опт. и спектр., 1968, 24, № 5, с. 765.
12. Славянов С. Ю.— ЖЭТФ, 1973, 64, № 3, с. 785.
13. Norikatsu I.— Trans. Inst. El. and Commn. Japan, 1973, B-56, № 6, p. 244.
14. Шестопапов В. П. Дифракционная электроника.— Харьков: Вища школа, 1975.
15. Деркач В. Н.— ДАН УССР, сер. А, 1981, № 5, с. 65.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
21 сентября 1982 г.

INVESTIGATION OF QUASI-OPTICAL RESONATORS BY SPACE SPECTRAL METHOD

A. A. Vertij, V. N. Derkach, V. P. Shestopalov

An investigation of electromagnetic field structure of two-mirror open resonator (OR) degenerated oscillations using the radiostructure analysis has been carried out. It is shown that the presence of disturbing OR field factors leads to incomplete degeneration and as a result to broadening of a resonance mode curve. The problem of coupling OR system application for control radio-transmission material dielectric parameters is discussed.