

УДК 621.317.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА С ПРИЗМОЙ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

А. А. Вертуй, Н. А. Попенко, С. И. Тарапов, В. П. Шестопапов

Проведены исследования трехзеркального открытого резонатора миллиметрового диапазона радиоволн с элементом полного внутреннего отражения. На частоте 75 ГГц проведены экспериментальные исследования спектра колебаний, коэффициента передачи, добротности и распределения полей в резонансной системе. Показано наличие анизотропии спектральных характеристик данного резонатора.

Как показано в работах [1, 2, 3], применение открытых резонаторов (ОР) в спектроскопии миллиметрового (мм) диапазона позволяет увеличить чувствительность и разрешающую способность спектрометров, а также расширить класс исследуемых веществ. С другой стороны, развитие радиологических методов анализа полей в открытых резонансных системах [4, 5] позволило создать новый тип приборов для исследования свойств веществ — резонансные спектрополяриметры.

В данном сообщении описано исследование спектральных характеристик трехзеркального открытого резонатора миллиметрового диапазона волн с элементом полного внутреннего отражения (ПВО). Применение предлагаемого ОР, например, в качестве резонансной ячейки спектрометра позволит исследовать вещества с большими потерями. При этом за счет наличия регулируемой связи образца с полем ОР высокая добротность системы может быть сохранена.

Особенностью исследуемого ОР (рис. 1) является применение в качестве одного из зеркал диэлектрической призмы 2. Угол (γ) при вершине призмы выбран так, чтобы плоская волна, фронт которой параллелен боковой грани, падая на наружную грань призмы, претерпевала полное внутреннее отражение (ПВО) от последней. Для призмы из фторопласта ($n = 2,04$) $\gamma = 90^\circ$. Оси металлических зеркал 1, 4 совпадают с нормальными к боковым граням призмы и пересекаются в центре наружной грани под углом ϕ .

Поскольку величина характерных размеров резонатора составляет несколько длин волн, то точный аналитический расчет этой системы затруднен. Поэтому были проведены экспериментальные исследования следующих характеристик такой системы: спектра колебаний, коэффициента передачи, добротности (измеряется методом комбинационных частот) и распределения полей (регистрируется методом пробного тела). Измерения проводились в случае, когда вектор E возбуждающего ОР линейно-поляризованного поля был компланарен плоскости наружной грани призмы.

На рис. 2 изображен спектр данного ОР при перемещении металлического зеркала 1 вдоль своей оси. В спектре присутствуют моды как нулевого, так и высшего порядков. Амплитудные распределения полей внутри ОР в плоскости, перпендикулярной оси зеркала 1 (рис. 3а), регистрировались при изменении угла между зеркалами в диапа-

зоне $90^\circ \leq \varphi \leq 170^\circ$. Характерной особенностью распределения полей является смещение максимума поля от оси металлического зеркала к ближним к вершине призмы краям зеркала. Причем с увеличением φ это смещение растет. (Сплошная линия соответствует $\varphi = 100^\circ$, пунктир $\varphi = 140^\circ$.) Рассмотрим процесс формирования колебаний в таком резонаторе. Известно [7], что в ОР поле представляется в виде суперпозиции плоских волн, амплитуды которых определяются видом функции спектральной плотности данного типа колебаний. В данном случае для плоских волн, симметричных относительно осевого направления волнового пучка, коэффициенты отражения от наружной грани различны, а, следовательно, функции спектральной плотности для этого ОР отлична от функции спектральной плотности двухзеркального ОР, что приводит к смещению максимума в амплитудном распределении поля в сторону от оси зеркала к краям, ближним к вершине призмы. При изменении угла между зеркалами φ наблюдается изменение положения максимума поля резонансного колебания, а также появляются несимметричные боковые максимумы (рис. 3а, пунктир).

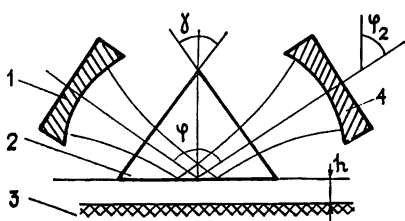


Рис. 1.

Рис. 1. Открытый резонатор с призмой ПВО: 1, 4 — металлические астигматические зеркала, 2 — тефлоновая призма, 3 — исследуемый образец.

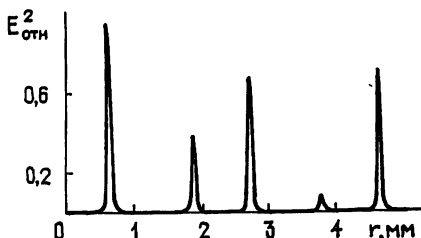


Рис. 2.

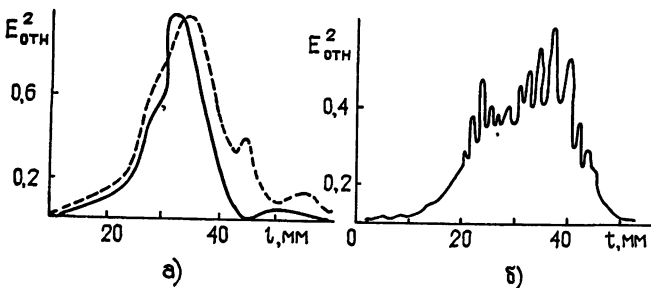


Рис. 3.

Рис. 3. а) Амплитудное распределение резонансного поля между металлическим зеркалом 1 и боковой гранью призмы в сечении, параллельном плоскости зеркала; ось зеркала расположена на $l = 30$ мм; пунктир $\varphi = 140^\circ$, сплошная кривая $\varphi = 100^\circ$; б) амплитудное распределение резонансного поля за призмой ПВО вдоль наружной грани. Точка пересечения осей металлических зеркал соответствует $t = 30$ мм.

Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость добротности Q от угла φ между осями металлических зеркал; сплошная кривая $\gamma = 90^\circ$, пунктир $\gamma = 80^\circ$.

Правильность предложенной модели подтверждается зависимостью добротности от φ (рис. 4). При углах $\varphi \leq 90^\circ$ ($\gamma = 80^\circ$ — пунктирная линия) добротность колебаний очень мала из-за того, что для большей части парциальных плоских волн из волнового пучка не выполняется условие ПВО на внешней границе призмы. С увеличением φ число плоских волн, выходящих из призмы, уменьшается, и при угле $\varphi \approx 100^\circ$ эффект ПВО наблюдается для подавляющей части плоских волн, участвующих в формировании резонансного колебания. При углах $\varphi \geq 150^\circ$

пятно поля сильно смещается к краю зеркала и часть углового спектра плоских волн уже не перехватывается апертурой зеркала. Добротность падает, и при углах $\varphi \geq 165^\circ$ радиационные потери настолько возрастают, что приводят к срыву резонансных колебаний. Для ОР с призмой, у которой угол $\gamma = 90^\circ$, условие ПВО наблюдается для плоской волны с фазовым фронтом, параллельным боковым граням призмы. Максимальная добротность ОР с этой призмой меньше, чем для ОР с призмой, у которой угол $\gamma = 80^\circ$, так как в первом случае в области углов φ , соответствующих максимальной добротности, условие ПВО наблюдается для меньшей части парциальных плоских волн из волнового пучка. Волновой пучок, падая на боковую грань призмы с $\gamma = 80^\circ$ под углом α к его наружной грани, будет иметь больший угол падения на наружную грань, чем пучок, падающий под таким же углом α к наружной грани на боковую грань призмы с $\gamma = 90^\circ$. Поэтому для $\gamma = 80^\circ$ вся зависимость смещена в сторону меньших углов.

Необходимо отметить, что при нарушении симметрии системы, а именно, при повороте призмы вокруг точки пересечения осей металлических зеркал в плоскости чертежа (рис. 1), наблюдается резкое снижение добротности колебаний. Добротность падает в e раз уже при повороте призмы на угол $1,5 \div 2^\circ$. То есть при настройке системы практически допустимы нарушения ее симметрии не более чем на $0,5 \div 1^\circ$.

Амплитудное распределение резонансного поля за наружной гранью призмы регистрировалось методом пробного тела. Поглощающий зонд размера $d \approx \lambda/4$ перемещался с помощью сканирующего устройства вдоль наружной грани на расстоянии $r \approx 1$ мм от нее. Амплитудное распределение резонансного поля за наружной гранью имеет интерференционную природу и убывает вдоль нормали к грани (рис. 3б). Если в это поле внести образец Z (рис. 1), то будет наблюдаться эффект нарушенного полного внутреннего отражения. При этом, естественно, произойдет сдвиг собственных частот ОР, оценку которого можно получить при решении следующей модельной задачи. Рассмотрим резонатор, состоящий из плоских зеркал с размерами, значительно превышающими длину волны.

Пусть фазовые фронты плоских волн, распространяющихся в таком ОР, параллельны соответствующим граням призмы и зеркалам. При отражении от наружной грани призмы падающая волна изменяется в ρ раз, где ρ — комплексный коэффициент отражения, различный для \perp - и \parallel -поляризации падающей волны. Удовлетворяя граничным условиям на зеркалах и условиям непрерывности E_τ и H_τ на границах призма — свободное пространство, можно получить дисперсионное уравнение, связывающее геометрические характеристики резонатора, ρ и ϵ — призмы и собственные числа с волновым вектором k .

Это уравнение имеет вид

$$\varphi_\rho + 2k\sqrt{\epsilon}H \sin(\gamma/2) + \arctg[\sqrt{\epsilon} \operatorname{tg}(kL_1)] + \arctg[\sqrt{\epsilon} \operatorname{tg}(kL_2)] = \pi q,$$

где φ_ρ — фаза коэффициента отражения, k — волновой вектор, H — высота призмы, γ — угол при вершине призмы, L_1, L_2 — расстояние от грани призмы до соответствующих зеркал, q — число полуволн в ОР.

Расчет величины ρ такой системы трех сред можно найти, например, в [6]. Величина φ_ρ зависит от угла падения, ϵ всех трех сред и расстояния до исследуемого образца h . Величина h характеризует степень связи образца с резонатором. Изменения от этих переменных для φ_{ρ_\perp} и φ_{ρ_\parallel} различны. Это указывает на возможность использования методов спектрополяриметрии для определения ϵ исследуемого образца по известным остальным параметрам,

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что данная резонансная система обладает высокой добротностью ($Q = 20 \cdot 10^3$), величина которой несущественно изменяется в большой области углов φ , и имеет следующие преимущества по сравнению с двухзеркальными ОР.

Это, во-первых, наличие регулируемой распределенной связи с образцом, что позволит измерять ε и другие характеристики веществ произвольной толщины и обладающих большими потерями. Различие спектральных характеристик для перпендикулярной и параллельной поляризации полей позволит использовать методы спектрополяриметрии в таких системах.

Во-вторых, появляется отсутствовавшая ранее возможность смены образца без изменения положения самой резонансной системы, что повышает точность при многократных измерениях. Это особо важно при создании спектрометров для исследования веществ при низких и сверхнизких температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вертий А. А., Иванченко И. В., Попков Ю. П., Шестопапов В. П. Препринт ИРЭ АН УССР № 134.— Харьков, 1979.
2. Прозорова А. А., Максименков П. П. Электроника больших мощностей.— М.: Наука, 1968, № 5, с. 59.
3. Андросов В. П., Вертий А. А., Комарь Г. И., Попков Ю. П., Шестопапов В. П. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума по миллиметровым и субмиллиметровым волнам. — Горький, ИПФ АН СССР, 1980, 1, с. 187.
4. Вертий А. А., Деркач В. Н., Шестопапов В. П. — ДАН УССР, 1978, № 3, с. 247.
5. Вертий А. А., Иванченко И. В., Шестопапов В. П. — ПТЭ, 1981, № 1, с. 155.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах.— М.: Наука, 1973.— С. 16.
7. Третьякова С. С., Третьяков О. А., Шестопапов В. П. — Радиотехника и электроника, 1972, 17, № 7, с. 1366.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
21 сентября 1981 г.,
после сокращения
19 января 1982 г.

INVESTIGATION OF AN OPEN RESONATOR WITH A PRISM OF COMPLETE INTERNAL REFLECTION

A. A. Vertij, N. A. Popenko, S. I. Tarapov, V. P. Shestopalov

A three-mirror open resonator of the millimeter wave range with an element of complete internal reflection is presented. The oscillation spectrum, coefficient of transfer, Q -factor and field distribution in the resonance system are experimentally studied. at 75 GHz the presence of anisotropy of the spectral characteristic of the given resonator is shown.
