

УДК 621.317.37

ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

A. A. Вертий, Н. А. Попенко, Ю. П. Попков, С. И. Тарапов

Теоретически (в приближении плоских волн) и экспериментально изучены спектральные характеристики открытого резонатора с призмой полного внутреннего отражения при расположении вблизи нее диэлектрических образцов. Показано удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

Двухзеркальные открытые резонаторы (ОР) хорошо зарекомендовали себя в качестве резонансных систем различных приборов и устройств миллиметрового диапазона длин волн. Однако в ряде конкретных ситуаций возникает необходимость в разработке оригинальных конструкций резонаторов. Так, например, в работе [1] в целях использования в сверхнизкотемпературном спектрометре предложен трехзеркальный ОР (рис. 1), в котором роль одного из зеркал выполняет наружная грань диэлектрической призмы (3), размещенной между двумя металлическими отражателями (1, 2). Появление резонансных колебаний в системе, состоящей из зеркал и призмы, основано на использовании явления полного внутреннего отражения (ПВО). Показано, что резонансная ячейка с ПВО обладает высокой добротностью, возможностью регулировать связь резонансного поля ОР с исследуемым образцом и, что особенно важно,— имеет различные спектральные характеристики для двух взаимноортогональных поляризаций резонансных колебаний.

Последний факт является принципиальным при использовании такого ОР в качестве резонансной системы спектрометра магнитного резонанса. Как известно из работ [2, 3], при прохождении линии магнитного резонанса наряду с поглощением одной из циркулярно поляризованных волн появляется резонансное парамагнитное вращение плоскости поляризации (РПВ). В результате этого наблюдается снятие поляризационного вырождения и расщепление спектра двухзеркального ОР, что в свою очередь приводит к искажению формы линии магнитного резонанса или ее значительному уширению. При применении предложенного в [1] трехзеркального резонатора РПВ проявляется лишь в сдвиге

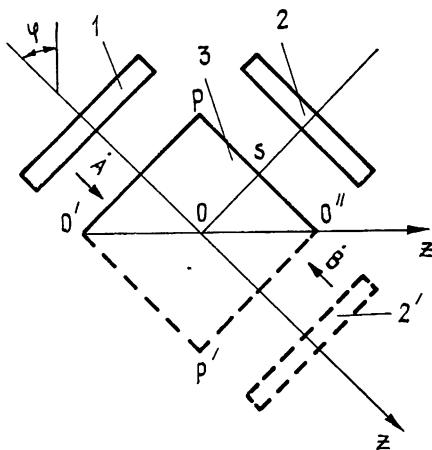


Рис. 1. Трехзеркальный ОР с призмой ПВО; 1, 2, 2'—металл, 3—диэлектрическая призма ПВО.

резонансных мод, что легко компенсируется использованием системы АПЧ. Кроме того, построение на таком ОР сверхнизкотемпературной резонансной ячейки спектрометра магнитного резонанса обеспечивает возможность смены образца без изменения положения самой резонансной системы, что повысит точность при многократных измерениях.

В данной работе проводится дальнейшее теоретическое и экспериментальное исследование трехзеркального ОР с призмой ПВО и различными образцами с целью выяснения правомочности предложенной теоретической модели и выработки рекомендаций при построении резонансной ячейки низкотемпературного спектрометра магнитного резонанса.

Расчет спектра резонансной ячейки ПВО. Рассмотрим ОР, представленный на рис. 1. Будем считать, что электромагнитные волны, распространяющиеся в такой системе, — плоские, причем волновой вектор нормален к плоскостям зеркал и к граням призмы, близлежащим к отражателям 1, 2. Оси зеркал пересекаются на наружной грани призмы в точке O , являющейся серединой образующей грани $O'O''$. Исходя из того, что отражение и преломление плоских волн подчиняется законам геометрической оптики, можно представить резонансную систему в виде двухзеркального ОР с помещенной внутри диэлектрической пластиной, толщиной $2OS$. В этом случае центры отражателей и диэлектрической пластины будут лежать на одной оси OZ' , как показано пунктирной линией на рис. 1.

Таким образом, определение спектральных характеристик исследуемого трехзеркального ОР с призмой ПВО свелось к решению задачи о двухзеркальном резонаторе с плоскопараллельным диэлектрическим слоем между зеркалами. При этом наличие грани полного внутреннего отражения в призме $O'O''$ учитывается комплексным коэффициентом отражения ρ , который входит в коэффициенты отражения и прохождения диэлектрического слоя $O'PO''P'$.

Рассмотрим две плоские волны с комплексными амплитудами A и B , распространяющиеся навстречу друг другу от зеркал 1 и 2 соответственно. При прохождении и отражении от диэлектрического слоя $O'PO''P'$ они изменяют свои комплексные амплитуды на величину коэффициентов отражения и прохождения соответственно. Удовлетворяя граничным условиям на зеркалах и условию самосопряжения и опуская промежуточные выкладки, получим следующее выражение для резонансного расстояния между зеркалами трехзеркального ОР с призмой ПВО:

$$L_p = (\lambda/2)(2n + 1) - k_2^{-1} [(k_1 - k_2)\delta + (\pi/2) + \operatorname{arctg} \operatorname{Im} M/\operatorname{Re} M]. \quad (1)$$

Здесь λ — длина волны, n — большое целое число, k_2 — волновой вектор в свободном пространстве, k_1 — волновой вектор в диэлектрике, δ — длина пути волны в диэлектрике (призме), $M = f(k_2, \delta, a, \rho)$ — трансцендентная функция, a — расстояние от зеркала 1 до внутренней грани призмы, ρ — коэффициент отражения от наружной грани призмы.

Так как величина коэффициента отражения ρ различна для двух взаимно ортогональных поляризаций падающей волны (E_{\parallel} и E_{\perp}), то вырождение по поляризации в спектре ОР с ПВО отсутствует.

Для конкретных применений ОР в спектрометре или для измерения характеристик диэлектрических материалов необходимо провести расчет спектральных характеристик резонатора с образцом. Отличие этой задачи от рассмотренной выше состоит в наличии сложной грани $O'O''$, представляющей собой многослойную структуру: диэлектрик призмы с ϵ_1 , воздух — ϵ_2 , образец — ϵ_3 . Воспользуемся выведенными в [4] формулами для ρ в такой системе слоев при падении на нее плос-

кой волны. Тогда в результате расчета на ЭВМ по формуле (1) при различных значениях ρ получим спектральные характеристики следующих резонансных структур: трехзеркального ОР с ПВО, ОР с диэлектрической полуплоскостью, расположенной на расстоянии h от грани ПВО, ОР с образцом, толщина которого произвольна и равна d , в случае, когда $\epsilon_3'' = 0$ и $\epsilon_3'' \neq 0$.

Теоретический анализ характеристик ОР проводился по следующим параметрам. С целью определения максимальной величины расщепления резонансного расстояния между зеркалами ОР на двух ортогональных поляризациях ($\delta L_p = |L_{\perp} - L_{\parallel}|$, в ходе решения задачи рассчитывались зависимости $L_{\perp}(\phi)$ и $L_{\parallel}(\phi)$ (где 2ϕ — угол между зеркалами резонатора). Поскольку одним из преимуществ данного ОР является наличие регулируемой связи с образцом, то было проведено изучение величины возмущения резонатора (сдвига резонансной частоты) как функции расстояния от грани ПВО до образца: $L_{\perp}(h)$, $L_{\parallel}(h)$ при различных значениях ϵ_1 и ϵ_3 . Рассчитаны спектры перечисленных выше структур при выбранных параметрах 2ϕ и h .

Рассмотрим зависимости $L_{\perp,\parallel} = f(\phi)$ при различных значениях диэлектрических проницаемостей ϵ_1 и ϵ_3 при фиксированных $h = \infty$; 1; 0,5 мм (рис. 2). При углах $\phi < 45^\circ$ перестает выполняться условие ПВО в призме, добротность ОР резко падает. Поэтому все расчетные кривые начинаются с углов $\phi \approx 45^\circ$. Другой граничной точкой зависимости $L_{\perp,\parallel} = f(\phi)$ является точка $\phi = 90^\circ$ при $\epsilon_1 \leq \epsilon_3$, где ОР трансформируется в двухзеркальный ОР с плоскими зеркалами и диэлектрической пластиной между ними; колебания в этом случае поляризационно вырождены (рис. 2а, б). При $\phi = 90^\circ$ наблюдается равенство резонансных расстояний между зеркалами для L_{\perp} и L_{\parallel} при всех значениях h . Отметим, что в случае $\epsilon_1 > \epsilon_3$, начиная с некоторых значений ϕ , в образце также выполняются условия ПВО: $\phi_{\text{ПВО}} = 70^\circ$ для рассматриваемого соотношения ϵ_1 и ϵ_3 (рис. 2в). Из рис. 2 видно, что область углов ϕ , соответствующих максимальной разности δL во всех случаях, лежит в интервале $55 \div 70^\circ$. Таким образом, угол между зеркалами резонатора при применении его в качестве резонансной ячейки спектрометра должен попадать в этот интервал значений ϕ для обеспечения высокой разрешающей способности спектрометра.

При $\epsilon_3 = 0,9\epsilon_1$ и $\epsilon_3 = \epsilon_1$ (рис. 2а, в) при некоторых углах ϕ наблюдаются точки, где L_{\parallel} и L_{\perp} не зависят от h , что, по-видимому, связано с равенством фазы коэффициента отражения ρ значению $\pi/2$. Вариацией величин ϵ_3 и ϵ_1 , а также прицельного параметра h можно добиться поляризационного вырождения колебаний трехзеркального ОР. Так, например, для $\epsilon_3 = 2\epsilon_1 = 4,08$ точка $L_{\parallel} = L_{\perp}$ соответствует $\phi = 61^\circ$ при $h = 0,5$ мм. Данное свойство исследуемого резонатора может быть применено при построении на его основе спектрополяриметра [5], позволяющего увеличить чувствительность измерений.

На рис. 3 представлены зависимости $L_{\parallel,\perp} = f(h)$ при выбранном из рис. 2 угле $\phi = 65^\circ$ ($\epsilon_3 = \epsilon_1 = 2,04$) для случаев ОР с диэлектрической полуплоскостью ($d = \infty$) и ОР с пластиной $d = 2,0$ мм.

Для полуплоскости при $h \rightarrow 0$ наблюдается поляризационное вырождение колебаний, так как граница раздела двух сред при этом исчезает. Начиная с $h = 1,2$ мм, полуплоскость выходит за пределы резонансного поля, и значения L_{\parallel} и L_{\perp} соответствуют резонансным расстояниям между зеркалами ОР без полуплоскости. Для диэлектрической пластины отсутствие возмущения резонансного колебания наблюдается при значениях $h > 3$ мм. При уменьшении h сдвиг резонансной частоты растет, достигая своего максимума при $h \rightarrow 0$. При непрерывном изменении толщины пластины и неизменном h величины L_{\perp} и L_{\parallel} будут осциллировать с периодом, равным половине длины волны в образце.

и с постоянной амплитудой, если $\epsilon_3'' = 0$. Более сильное возмущающее действие образца конечной толщины d определяется переотражениями от его второй границы.

На основании приведенных выше расчетных данных построены спектры для трех исследуемых структур (рис. 4). Внесение в резонансное поле образца приводит как к смещению резонансных расстояний

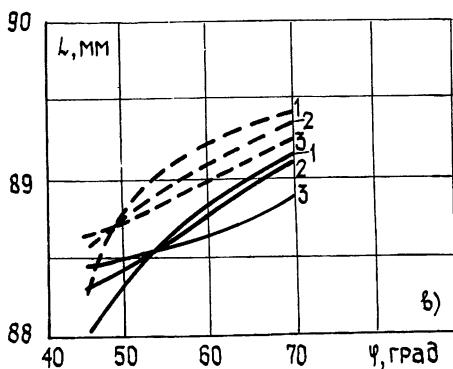
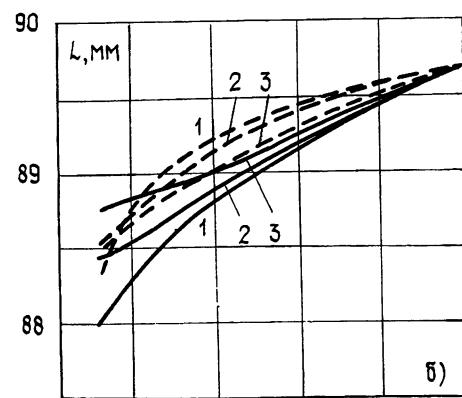
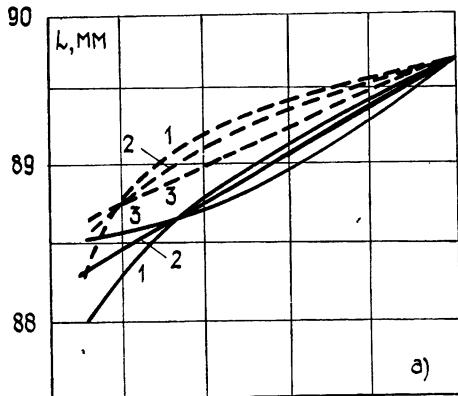


Рис. 2.

Рис. 2. Зависимость $L_{\perp, \parallel}$ от угла между зеркалами 2ϕ для призмы ПВО с $\epsilon_1=2,04$,
а) $\epsilon_3=2,04$, б) $\epsilon_3=4,08$, в) $\epsilon_3=1,86$, 1— $h=30$ мм; 2— $h=1$ мм; 3— $h=0,5$ мм.

Рис. 3. Зависимость $L_{\perp, \parallel}$ от прицельного расстояния h : 1—ОР с диэлектрической полуплоскостью $\epsilon_3=2,04$, $d=0$, 2—ОР с диэлектрическим слоем $\epsilon_3=2,04$, $d=2$ мм; штриховая кривая— L_{\parallel} , сплошная кривая— L_{\perp} , крестики—экспериментальные точки.

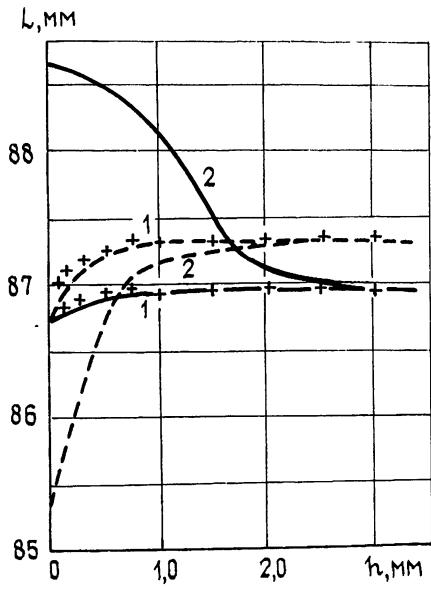


Рис. 3.

между зеркалами в сторону уменьшения расстояния, так и к изменению величины расщепления L_{\parallel} и L_{\perp} . Отметим, что для данных значений ϵ_1 , ϵ_3 и d относительная величина возмущения, вносимая пластиной, существенно больше, чем для полуплоскости при $h=0,5$ мм. Также изменяется и величина δL .

На последнем графике (рис. 4в) представлены также спектры для пластины, у которой ϵ_3 не равно нулю. При $\operatorname{tg}\delta < 10^{-2}$ учет потерь не приводит к существенному изменению спектра ОР. Поэтому при теоретических расчетах спектральных характеристик резонатора учет ϵ_3 целесообразно проводить, начиная с величин $\operatorname{tg}\delta > 10^{-2}$ при значениях $\epsilon_1, \epsilon_3 < 5.0$.

Экспериментальные исследования. Учитывая тот факт, что теоретический анализ проводился в приближении плоских волн, а практический интерес представляют ОР с зеркалами с квадратичной коррекцией, то возникает необходимость в сравнении полученных теоретических результатов с экспериментом. Изучались спектральные характеристики трехзеркального ОР, образованного двумя металлическими сферическими зеркалами с радиусом кривизны $R = 180$ мм и призмой ПВО из фторопласта ($\epsilon_1 = 2,04$) с углом при вершине $2\phi = 130^\circ$. Измерения проводились на длине волны 4 мм. Перестройка резонатора осуществлялась путем перемещения одного из сферических зеркал. ОР возбуждался посредством щели связи в центре зеркала, причем вектор E возбуждающего поля был ориентирован под углом 45° к плоскости ZOZ' (см. рис. 1).

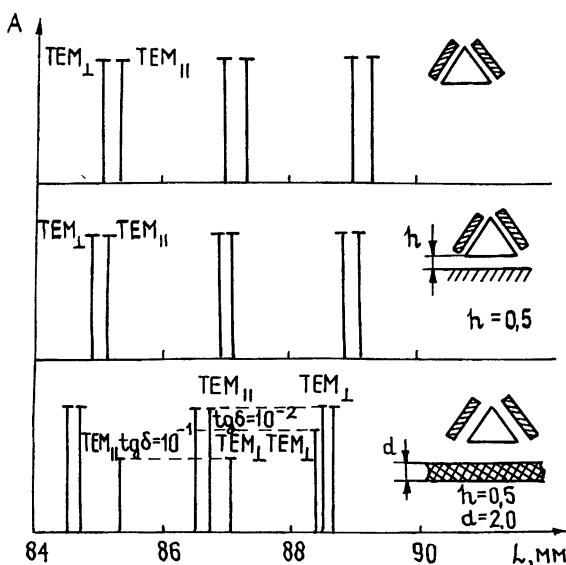


Рис. 4. Спектральные характеристики трехзеркального ОР.

Правильность предложенной теоретической модели для пустого ОР подтверждается сравнением теоретического и экспериментально полученного спектров. Величины $\delta L = L_{\parallel} - L_{\perp}$, теоретические и экспериментальные, совпадают с графической точностью (рис. 3 — значение $h > 3,0$ мм).

Для более сложной структуры ОР с диэлектрической полуплоскостью были проведены исследования зависимости $L_{\perp, \parallel}$ от прицельного параметра h . В этом случае образец располагался на подвижной каретке и юстировался параллельно грани ПВО. Экспериментальные точки напечатаны на рис. 3 (кривые 1). Отметим, что при $h > 0,3$ мм совпадение с теорией наблюдается в пределах ошибки измерений (7%). Увеличение расхождения теории с экспериментом при $h \leq 0,3$ мм обусловлено различиями реальной системы от теоретической модели. В теории мы считаем, что амплитудно-фазовое распределение поля резонанс-

ного колебания остается постоянным при наличии образца. В реальной ситуации при сильном возмущении резонатора и нарушении условия ПВО спектральные компоненты углового спектра резонансного волнового пучка [6] претерпевают различное возмущение. В связи с этим наблюдается изменение амплитудно-фазового распределения поля резонансного колебания, что и обуславливает дополнительное нарушение резонансных условий.

Предложенное объяснение подтверждается характером изменения коэффициента передачи ОР для колебания TEM_{00n} при уменьшении h (рис. 5).

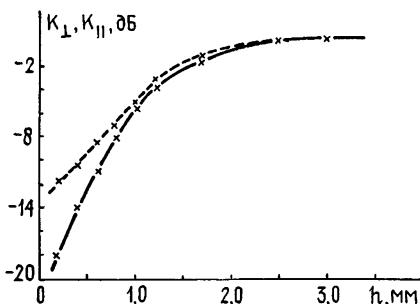


Рис. 5.

Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи ОР с диэлектрической полуплоскостью от прицельного расстояния h .

Рис. 6. Зависимость $L_{\perp, \parallel}$ от прицельного расстояния h для образца конечной толщины;
сплошные кривые — L_{\parallel} , штриховые кривые — L_{\perp} , 1, 2 — теоретические кривые для $d = 2 \text{ мм}$ и $d = 2,5 \text{ мм}$ соответственно; $\times +$ — экспериментальные точки для L_{\parallel} и L_{\perp} соответственно.

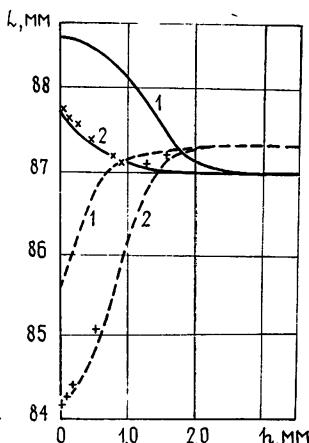


Рис. 6.

Практический интерес представляет структура с образцом конечной толщины d . Анализ полученных экспериментально зависимостей $L_{\perp, \parallel} = f(h)$ для $d = 2,0 \text{ мм}$ (рис. 6) показывает, что теоретическая модель требует введения эмпирической величины — эффективной толщины $d_{\text{эфф}}$. В данном случае при $d_{\text{эфф}} = 2,5 \text{ мм}$ наблюдается соответствие теории и эксперимента с точностью до 7%.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1) Определение спектральных характеристик трехзеркального ОР с призмой ПВО в приближении плоских волн можно проводить и для ОР со сферическими зеркалами, в случае больших $kR \sim 270$.

2) При значении прицельного параметра $h > 0,3 \text{ мм}$ для ОР с диэлектрической полуплоскостью наблюдается совпадение экспериментальных и теоретических результатов в пределах 7%. Однако в случае диэлектрического слоя, расположенного вблизи грани ПВО, отличия теории от эксперимента возрастают (погрешность $\sim 15\%$).

3) При исследовании образцов с $\epsilon' < 5$, $\text{tg}\delta < 10^{-2}$ расчет спектральных характеристик не требует учета поглощения в образцах.

4) Анализ теоретических и экспериментальных результатов показывает, что диапазон углов при вершине призмы ПВО, при которых достигается максимальная разность $\delta L = L_{\perp} - L_{\parallel}$, лежит в области $110\text{--}140^\circ$. При этом сохраняется высокая добротность колебаний.

5) Исследования показали, что при уменьшении прицельного параметра увеличивается чувствительность измерений. Однако при малых значениях $h < 0,3$ мм резко уменьшается добротность колебаний. Поэтому наиболее оптимальными значениями являются h от 0,5 до 1,5 мм в зависимости от d и ϵ образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вертий А.А., Попенко Н.А., Тарапов С.И., Шестопалов В.П. — Изв вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 6, с. 684.
- 2 Непримеров Н.Н.— Изв. АН СССР, 1956, 20, № 11, с 1236
3. Vertiy A. A., Popkov Yu. P., Shestopalov W. P. Proc of the 1-st Soviet-Indian Symposium Actual problems of magnetic resonance spectroscopy of inorganic materials.— Dushanbe, 1982, p 202 ;
4. Бреховских Л.М Волны в слоистых средах — М: Наука, 1973
- 5 Вертий А.А., Иванченко И.В., Попков Ю.П., Шестопалов В.П. Препринт ИРЭ АН УССР № 134. Харьков, 1979, с 39.
- 6 Третьякова С.С., Третьяков О.А., Шестопалов В.П — Радиотехника и электронника, 1972, 17, № 7, с. 1366

Институт радиофизики и электронники
АН УССР

Поступила в редакцию
19 июля 1983 г.

THREE-MIRROR OPEN RESONATOR IN MILLIMETER RANGE

A. A. Vertiy, N. A. Popenko, Yu. P. Popkov, S. I. Tarapov

Spectral characteristics of the open resonator containing a reflecting prisma with dielectric specimens located near it are investigated theoretically (in a plane wave approximation) and experimentally. A good agreement of theoretical and experimental results is shown.
