

Таким образом, исходя из метода падающих и отраженных волн получено аналитическое решение для переходных процессов в паре высокочастотных связанных резонаторов, работающих на собственной резонансной частоте. Частные случаи этого решения соответствуют известным результатам и подтверждаются проведенными экспериментами.

Система уравнений (3) легко обобщается на случай произвольного числа последовательно связанных резонаторов, что существенно расширяет ее возможности и область применения.

Список литературы

- [1] Slater J.C. Microwave Electronics. New York: Van Nostrand, 1951. 406 p.
- [2] Альварес Р.А. // ПНИ. 1986. № 10. С. 66-73.
- [3] Иванников В.И., Черноусов Ю.Д., Шеболаев И.В. // ВАНТ. Сер. ЯФИ (ТиЭ). 1989. № 6 (6). С. 55-58.
- [4] Бараев С.В., Коровин О.П., Минькин К.Г. // ЖТФ. 1983. Вып. 2 (53). С. 413-415.
- [5] Бараев С.В., Коровин О.П. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 4. С. 723-725.
- [6] Альтман Дж. Устройства СВЧ. М.: Мир, 1968. 487 с.
- [7] Geschonke G., Hansen S. // Particle Accelerators. 1990. Vol. 29. P. 77-84.

01;09;12

Журнал технической физики, т. 66, в. 5, 1996

ЭФФЕКТ ГАШЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРНЫМИ ДИЭЛЕКТРИКАМИ

© Р.М.Касимов, М.А.Калафи, Э.Р.Касимов, Ч.О.Каджар, Э.Ю.Салаев

Научно-исследовательский институт фотоэлектроники АН Азербайджана,
370602 Баку, Азербайджан
(Поступило в Редакцию 16 января 1995 г.)

Проблема создания неотражающих поглотителей электромагнитного излучения на основе доступных композиционных материалов и простой технологии их приготовления представляет большой практический интерес и привлекает внимание многих исследователей [1-3].

На основе анализа данных работы [3], а также предложенного в работе [4] метода измерения диэлектрических свойств полярных жидкостей и растворов в диапазоне СВЧ можно показать, что в слое полярного вещества при определенных частотах падающего излучения должен наблюдаться эффект полного гашения отраженного от проводящей поверхности электромагнитного излучения. Такое гашение веществом покрытия отраженного от идеально проводящей поверхности излучения будет иметь место в точках минимумов зависимости модуля коэффициента отражения волны R от толщины l слоя вещества, когда

эти минимумы достигают нулевых "резонансных" значений. Последнее выполняется при следующих условиях:

$$(1 + y^2)\lambda_b/\lambda_g = \text{th}(2\pi y l_0/\lambda_g) - y \text{tg}(2\pi l_0/\lambda_g), \quad (1)$$

$$y \text{sh}(4\pi y l_0/\lambda_g) + \sin(4\pi l_0/\lambda_g) = 0, \quad (2)$$

где $y = \text{tg} \Delta/2$; $\Delta = \text{arctg} \varepsilon''/(\varepsilon' - p)$; $p = (\lambda/\lambda_k)^2$; $\lambda_b = \lambda/\sqrt{1-p}$; ε' — диэлектрическая проницаемость; ε'' — диэлектрические потери; λ , λ_b , λ_g — длины волн соответственно в свободном пространстве, пустой направляющей системе и в направляющей системе, заполненной веществом; λ_k — критическая длина волны, определяемая геометрией используемой направляющей системы; l_0 — толщина слоя жидкости, при которой $R = 0$.

Так как

$$\varepsilon' = p + (1 - y^2)(\lambda/\lambda_g)^2, \quad \varepsilon'' = 2y(\lambda/\lambda_g)^2, \quad (3)$$

то совместное решение уравнений (1)–(3) позволяет установить функциональную связь между диэлектрическими коэффициентами, которым соответствуют условия безотражательного поглощения излучения в веществе. Для общности представления результаты совместного решения уравнений (1)–(3) даются на рис. 1 (кривые А) в координатах приведенных значений диэлектрической проницаемости $\varepsilon_1 = (\varepsilon' - p)/(1 - p)$ и диэлектрических потерь $\varepsilon_2 = \varepsilon''/(1 - p)$. Они получены соответственно для первых трех минимумов зависимости R от l при условии, что в точках минимума этой зависимости принимается условие $R = 0$. Каждой точке семейства кривых А на рис. 1 соответствует определенное значение приведенной толщины слоя l_0/λ_b вещества. Для наглядности на кривых зависимостей ε_2 от ε_1 нанесены масштабные риски со значениями l_0/λ_b .

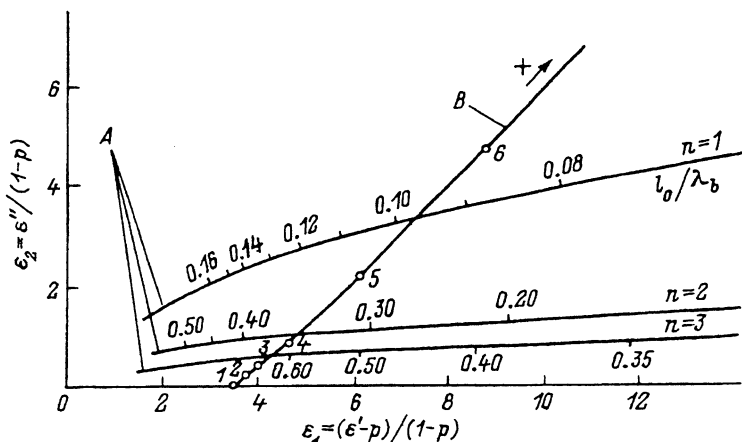


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные зависимости между приведенными значениями диэлектрической проницаемости ε_1 и диэлектрических потерь ε_2 . А — теоретически рассчитанные функциональные связи между приведенными значениями ε_1 , ε_2 и толщиной l отражающего слоя, соответствующие условиям резонансного безотражательного поглощения электромагнитных волн в веществе; В — экспериментальная зависимость ε_2 от ε_1 растворов вода-диоксан при весовых концентрациях воды x 0 (1), 0.68 (2), 1.36 (3), 3.64 (4), 10.6 (5) и 23.9% (6) при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ и длине волны $\lambda = 1.5$ см.

Таким образом, точкам семейства кривых на рис. 1 соответствуют такие резонансные значения ϵ' , ϵ'' , l_0 , при которых должен иметь место эффект гашения отраженного от проводящей поверхности излучения. Характерно, что с увеличением номера n эти зависимости приближаются к оси абсцисс. Последнее обстоятельство указывает на возможность безотражательного поглощения электромагнитного излучения веществом даже с очень малыми значениями диэлектрических потерь, которая, как следует из рисунка, реализуется при значительных толщинах слоя вещества.

Получить вещество с резонансными для заданной частоты излучения диэлектрическими коэффициентами можно путем подбора концентраций растворов полярных веществ, обладающих дисперсией в исследуемом диапазоне длин волн. При изменении состава таких растворов зависимости ϵ_2 от ϵ_1 при заданных значениях частоты излучения f и температуры раствора T описывают в плоскости координат $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ дугообразные кривые. Их положения определяются диэлектрическими свойствами отдельных компонентов раствора. Подбором последних можно добиться пересечения указанных кривых с одной или несколькими теоретическими кривыми резонансных значений диэлектрических коэффициентов.

Наибольший интерес в этой связи представляет анализ диэлектрических свойств бинарных растворов полярного вещества в неполярном растворителе. Так как у неполярного растворителя $\epsilon'' = 0$, то с ростом концентрации x полярного компонента в растворе зависимости ϵ_2 от ϵ_1 таких растворов будут начинаться с точки, лежащей на оси абсцисс ($x = 0$), и заканчиваться в верхней правой части плоскости $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ точкой с координатами, соответствующими полярному веществу. С увеличением в растворе концентрации неполярного растворителя координата рабочей точки в плоскости $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ при своем движении к оси абсцисс будет последовательно пересекать описываемые уравнениями (1)–(3) кривые резонансного поглощения излучения раствором. Учитывая характер расположения семейства кривых A , следует ожидать существования бесконечного ряда концентраций x полярного компонента и толщин l отражающего слоя раствора, при которых возникает полное гашение отраженного излучения.

Для экспериментального наблюдения эффекта гашения отраженно-го от проводящей поверхности СВЧ излучения были выбраны концентрированные растворы воды в диоксиде, диэлектрические свойства которых достаточно хорошо изучены в диапазонах сантиметровых и миллиметровых длин волн [5]. Измерения отражательных характеристик указанных растворов выполнялись при длине волны $\lambda = 1.5$ см и температуре $T = 20^\circ\text{C}$. Они проводились с использованием панорамного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению Р2-66 и Я2Р-67 и связанной с ним короткозамкнутой на конце измерительной волноводной ячейки; последняя термостатировалась и имела устройство регулирования толщины отражающего слоя раствора. Исследовалась зависимость модуля коэффициента отражения волны R от толщины l слоя раствора и концентрации его полярного компонента. Параллельно проводили количественную оценку диэлектрических свойств исследуемых растворов, применяя описанный в работе [6] метод измерений. Этот метод основан на определении ϵ' и ϵ'' раствора по данным из-

Резонансные значения диэлектрической проницаемости ϵ'_0 , диэлектрических потерь ϵ''_0 и весовых концентраций x_0 воды растворов вода-диоксан

Номер нулевых минимумов R	Вычисленные значения значения			Экспериментальные значения
	ϵ'_0	ϵ''_0	$x_0, \%$	$x_0, \%$
1	4.62	1.90	16.8	17.0
2	3.22	0.56	4.8	5.7
3	2.94	0.33	2.75	3.1
4	2.75	0.23	1.90	1.8
5	2.63	0.17	1.5	1.3
6	2.56	0.14	1.2	0.9

Примечание. Длина волны $\lambda = 1.5$ см, температура 20°C , критическая длина волны направляющей системы $\lambda_k = 2.3$ см.

мерения коэффициента стоячей волны η и толщины l гасящего слоя жидкости в экстремальных точках зависимости R от l .

Полученные результаты измерения диэлектрических свойств растворов вода-диоксан достаточно хорошо согласуются с данными работы [5] и указывают на существование в растворах при средних концентрациях воды двух дисперсионных областей, определяемых процессами релаксации молекул воды и ассоциируемых ими молекулярных комплексов. У неполярного диоксана $\epsilon'' = 0$, а $\epsilon' = 2.28$ при $\lambda = 1.5$ см и $T = 20^\circ\text{C}$; его рабочая точка в координатной плоскости $[\epsilon_1, \epsilon_2]$ лежит на оси абсцисс. У воды при тех же условиях измерения значения ϵ' и ϵ'' равны соответственно 36.8 и 36.4. Рабочая точка с этими значениями ϵ' и ϵ'' располагается значительно выше семейства теоретически

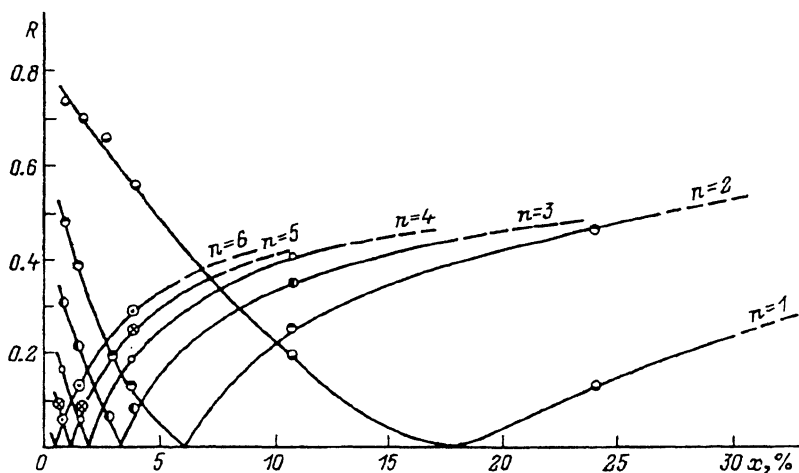


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения R электромагнитной волны от весовой концентрации x воды в растворе вода-диоксан для первых шести минимумов кривых R от толщины l слоя раствора. Длина волны $\lambda = 1.5$ см, температура $T = 20^\circ\text{C}$.

рассчитанных по уравнениям (1)-(3) зависимостей ε_2 от ε_1 . На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость ε_2 от ε_1 , построенная по данным настоящих измерений (кривая В). Она практически линейна и с уменьшением концентрации полярного компонента последовательно пересекает, начиная с первой ($n = 1$), все теоретически рассчитанные кривые зависимостей резонансных значений ε' и ε'' . Точкам пересечения будут соответствовать концентрации, при которых должен наблюдаться эффект гашения отраженного от проводящей поверхности излучения.

Эффект безотражательного поглощения обеспечивается соответствующим подбором толщин слоев раствора в измерительной ячейке и, как следует из анализа экспериментальной зависимости ε_2 от ε_1 , возникает при весовых концентрациях воды в растворе $x < 25\%$. Более точные данные о резонансных концентрациях x_0 воды в растворе, а также соответствующих им резонансных значениях диэлектрических проницаемостей ε'_0 и диэлектрических потерь ε''_0 растворов, представлены в таблице для первых шести нулевых минимумов R . Они получены графическим методом совместного решения уравнений (1)-(3) с учетом условий и результатов измерений ε' и ε'' растворов различных концентраций. Необходимость применения такого метода связана с отсутствием аналитических выражений, описывающих с достаточной точностью поведение ε' и ε'' растворов с изменением их концентраций. Для сравнения в таблице приведены резонансные концентрации воды в растворе, полученные из анализа экспериментальных концентрационных зависимостей модуля коэффициента отражения волны R в точках минимумов кривой R от l (рис. 2). Они хорошо согласуются с расчетными значениями x_0 . С уменьшением концентрации раствора для наблюдения эффекта гашения приходится увеличивать толщину слоя раствора.

Предлагаемые методы расчета и экспериментального наблюдения эффекта гашения отраженного излучения позволяют осуществить целенаправленный поиск композиционных материалов для поглотителей отраженного излучения не только в диапазоне сверхвысоких частот, но и фактически в любом участке электромагнитного излучения.

Список литературы

- [1] Харвей А.Ф. Техника сверхвысоких частот. М.: Сов. Радио, 1965. 784 с.
- [2] Ковнеристый Ю.К., Лазарев И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ излучение. М.: Наука, 1982. 164 с.
- [3] Preissner J. // NTZ Arch. 1989. Vol. 11. N 4. P. 175.
- [4] Касимов Р.М. // Измерительная техника. 1970. № 10. С. 48.
- [5] Garg S.K., Smith C.P. // J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 2959.
- [6] Касимов Р.М. // Метрология. 1987. № 7. С. 45.