

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ДИСПЕРСИИ ВОЛН НЕКОТОРЫХ ПОЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

М.А. САДЫХОВ, Э.Р. КАСИМОВ, Р.М. КАСИМОВ, Ч.О. КАДЖАР

*Институт Фотозлектроники АН Азербайджана
370141, Баку, ул. Ф. Агаева 555 квартал*

Приведены результаты исследования спектральных и пространственных характеристик, а также полосы безотражательного избирательного поглощения волн некоторых полярных жидкостей. Установлена связь между частотой излучения, толщиной отражающего слоя жидкости, полосы поглощения волн и статическими и динамическими диэлектрическими свойствами жидкостей. Даны обоснования возможности использования полярных жидкостей для создания на их основе дешевых и технологичных поглотителей СВЧ излучения.

Существующие поглотители микроволн, как правило, формируются на основе слоистых композиций из поглощающего матричного диэлектрического вещества и тонкопленочных или высокодисперсных металлических или ферромагнитных наполнителей [1,2]. В таких слоистых системах, расположенных на металлической подложке, поглощение излучения создается за счет скин-эффекта в поверхностном слое наполнителей, а выполнение условия избирательного поглощения падающего излучения в широкой полосе частот достигается подбором определенного числа и толщин композиционных слоев с различным содержанием в них поглощающих включений. Эти поглотители хорошо оправдывают себя в длинноволновой части микроволнового диапазона. С повышением частоты падающего излучения, из-за снижения диэлектрических потерь используемых композиционных материалов, у них резко ухудшаются способности к избирательному поглощению этих волн. Попытки скомпенсировать это естественное явление повышением концентрации поглощающих наполнителей в композиционных материалах покрытия приводят к утяжелению конструкции покрытия и ухудшению его механической прочности.

Вместе с тем, исследованием диэлектрических свойств полярных жидкостей и растворов установлено, что сходные эффекты безотражательного поглощения микроволнового излучения могут иметь место в системах, содержащих полярные молекулы и обладающих в этой связи дисперсией волн [3,4]. Избирательное поглощение в таких системах происходит при малых толщинах слоя покрытия и может быть реализовано в более широком диапазоне волн, включая и коротковолновую область миллиметрового диапазона микроволн.

Доступность диэлектрических материалов делает перспективным их использование при создании на их основе дешевых поглощающих систем микроволнового диапазона с применением простой технологии их приготовления. Однако, практическая реализация таких поглотителей в настоящее время затруднена из-за отсутствия соответствующей информации и об их спектральных и других характеристиках. Настоящая статья должна заполнить

этот пробел.

Согласно работам [3,5] безотражательное поглощение волн в наиболее простой двухслойной системе диэлектрик-металл может возникать в одном из минимумов зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l отражающего слоя диэлектрика, когда величина ρ в этом минимуме принимает нулевое значение. Условиям существования нулевых минимумов функции $\rho(l)$ удовлетворяют два уравнения

$$y \sin 4\pi x_0 y + \sin 4\pi x_0 = 0, \quad (1)$$

$$n(1+y^2) = R, \quad (2)$$

где $R = \tan 2\pi x_0 y - y \tan 2\pi x_0 = 0$; $n = \lambda_0 / \lambda_g$, ϵ' , ϵ'' - соответственно коэффициент преломления, диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери вещества покрытия;

$x_0 = l_0 / \lambda_g$; $y = \tan \delta / 2$; $\delta = \arctg \epsilon'' / \epsilon'$; l_0 , λ_0 , λ_g - соответственно толщина слоя покрытия, длина волны в свободном пространстве и в веществе покрытия, при которых в рассматриваемой системе возникает безотражательное поглощение падающего излучения.

Характерной особенностью функции $\rho(l)$ рассматриваемой двухслойной поглощающей системы является то, что минимальное ее значение реализуется при толщинах отражающего слоя несколько отличных от толщин, кратных $\lambda_g / 4$:

$$x_0 = \frac{2N - 1}{4} + \Delta, \quad (3)$$

где Δ - малая, но не нулевая величина, зависящая от свойств вещества покрытия и номера N нулевого минимума ρ [5].

Подстановка соотношения (3) для x_0 в уравнения (1) и (2) и исключение из полученных двух выражений общего параметра Δ , приводят к выражению:

$$\pi(2N - 1) + \arctg \frac{2ny}{n^2(1+y^2) - 1} = \frac{1}{2y} \ln \frac{(1+n)^2 + n^2 y^2}{(1-n)^2 + n^2 y^2}. \quad (4)$$

Полученные уравнения (1)-(4) устанавливают связь между y, n, l_0 вещества покрытия, длиной волны λ_0 падающего излучения и номером N нулевого минимума функции $\rho(l)$, при которых в рассматриваемой двухслойной системе возникают условия полного поглощения падающего излучения.

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi c \tau / \lambda)^2}; \varepsilon'' = 2\pi \frac{c}{\lambda} \tau \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi c \tau / \lambda)^2}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_0, \varepsilon_\infty$ - статическая и высокочастотная диэлектрическая проницаемость вещества покрытия, τ - время дипольной релаксации, c - скорость света [6].

Входящие в (4) ε' и ε'' связаны с n и y известными соотношениями

$$\varepsilon' = n^2 (1 - y^2); \varepsilon'' = 2n^2 y, \quad (6)$$

Таким образом, если известны статические и динамические диэлектрические свойства $\varepsilon_0, \varepsilon_\infty$ и время релаксации τ вещества покрытия, то из совместного решения системы уравнений (1)-(6) может быть найден спектр значений λ_0 и l_0 , при которых в слое выбранного диэлектрического покрытия возникает безотражательное (полное) поглощение падающего микроволнового излучения.

Одной из важных характеристик рассматриваемой двухслойной поглощающей системы микроволн является полоса длин волн $\Delta\lambda$ вблизи λ_0 , в пределах которой коэффициент отражения волны не превышает граничного и достаточно малого по величине значения ρ_r . Для ее оценки может быть использовано уравнение

$$\frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{sh4\pi x_0 y}{\pi x_0}, \quad (7)$$

полученное в работе [7] на основе анализа поведения функции $\rho(\lambda)$ в окрестностях ее нулевого минимума при фиксированном значении $l=l_0$.

Согласно работе [3], ожидаемый спектр частот излучения и толщин слоя вещества покрытия должен содержать низкочастотную и высокочастотную ветви, соответствующие начальной и конечной областям дисперсии волн вещества. Существующие в литературе экспериментальные данные СВЧ измерений о диэлектрических и релаксационных свойствах полярных веществ, как правило, достаточны для описания начальной и центральной областей дисперсии волн и экстраполяции по этим данным на хвостовую область с использованием уравнения Дебая или его модификаций, учитывающих возможность существования симметричного или асимметричного распределения времен релаксации вблизи наиболее вероятного. Во избежании возможных ошибок и получения достоверной информации в работе мы ограничились получением спектральных характеристик избирательного полного поглощения волн полярных веществ, диэлектрические свойства которых адекватно описываются уравнением

Для поиска искомым резонансных значений λ_0 и l_0 , при которых возможно существование эффекта полного поглощения излучения, необходимо знание поведения n и y вещества покрытия с частотой. Как правило, свойства многих полярных диэлектриков, в том числе и полярных жидкостей, хорошо описываются уравнениями Дебая:

Дебая (5), а их ожидаемые спектры частот попадают в диапазон сантиметровых и миллиметровых волн.

Для решения системы уравнений (1)-(7) с нахождением искомым величин λ_0, l_0 и $\frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ применен алгоритм по которому, для получения лучшей сходимости результатов вычисления проводились с использованием уравнений, полученных преобразованием или совместным решением исходных уравнений.

Из совместного решения уравнений (5), (6) получены используемые в расчетах соотношения и критерии

$$n = \frac{1}{(1 + y^2)} \sqrt{a(1 - y^2) (1 + \sqrt{1 - A^2})}, \quad (8)$$

$$\varepsilon' = a + \sqrt{b^2 - (\varepsilon'')^2}, \quad (9)$$

$$\lambda_0 = \frac{2\pi c \tau}{\varepsilon''} (\varepsilon' - \varepsilon_\infty), \quad (10)$$

$$y_m = \frac{\sqrt{\varepsilon_0} - \sqrt{\varepsilon_\infty}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_\infty}}, \quad (11)$$

где y_m — максимальная возможная величина фактора диэлектрических потерь, $a = (\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty) / 2$; $b = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) / 2$; $A = 2\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_\infty} (1 + y^2) / (\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty) (1 + y^2)$.

Разработанный алгоритм обеспечивает нахождение спектральных характеристик избирательного полного поглощения волн в диалоговом режиме работ исследователя с ЭВМ. Он включает начальную процедуру занесения в ее оперативную память значений статистической ε_0 , высокочастотной ε_∞ диэлектрических проницаемостей и времени релаксации τ выбранного материала покрытия, а также порядковый номер N нулевого минимума ρ . В процессе решения задачи выполняется поиск значений n и y , являющимися корнями уравнения (4) и (5). При этом для ускорения их поиска используются начальные значения $y = 0$ и $n = \sqrt{\varepsilon_0}$ и $\sqrt{\varepsilon_\infty}$ соответственно для расчета избирательных характеристик низкочастотной и высокочастотной ветвей спектра. Для расчета применены два последовательно чередующихся p и q шага вычислений, на каждом из которых итерационным способом определялись значения одного из варьируемых параметров при

Значения статической ϵ_0 и высокочастотной ϵ_∞ диэлектрических проницаемостей, времени релаксации τ , длины волны λ_0 , толщины l_0 слоя покрытия и полосы поглощения $\frac{1}{\rho_T} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ некоторых полярных жидкостей для низкочастотной и высокочастотной областей спектра безотражательного поглощения волн. Данные при температуре $T=20^\circ\text{C}$.

№	Вещество	Номер N минимума ρ	ϵ_0	ϵ_∞	$\tau \cdot 10^{12}$ сек	Низкочастотная ветвь			Высокочастотная ветвь		
						λ_0 см	l_0 см	$\frac{1}{\rho_T} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$	λ_0 мм	l_0 мм	$\frac{1}{\rho_T} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$
1	Вода	1	80.4	6.4	9.49	11.49	0.33	0.29	0.75	0.08	0.95
		2				34.61	2.90	0.10	0.27	0.08	0.39
		3				57.73	8.05	0.06	0.16	0.08	0.24
2	Хлороформ	1	4.81	2.22	6.36	—	—	—	—	—	—
		2				2.80	1.01	0.50	0.75	1.81	0.80
		3				4.98	2.89	0.30	0.27	1.78	0.55
3	Хлорбензол	1	5.74	2.55	7.0	—	—	—	—	—	—
		2				3.62	1.18	0.43	3.39	1.56	0.72
		3				6.36	3.34	0.26	1.98	1.54	0.49
4	Циклогексанон	1	16.0	2.18	10.3	4.98	0.33	0.68	2.48	0.25	1.62
		2				15.41	2.91	0.23	0.99	0.09	0.88
		3				25.73	8.08	0.14	0.62	0.06	0.58
5	2-винилпиридин	1	9.126	2.58	19.9	5.22	0.50	0.95	13.9	2.03	1.37
		2				18.11	4.58	0.32	4.41	2.06	0.75
		3				30.52	12.71	0.19	2.70	2.10	0.49
6	Анизол	1	4.39	2.60	12.3	—	—	—	—	—	—
		2				3.20	1.24	0.55	14.8	6.37	0.65
		3				6.57	4.02	0.32	6.70	5.09	0.47
7	2-этилпиридин	1	8.33	2.39	14.8	3.59	0.37	1.01	11.5	1.71	1.39
		2				12.71	3.37	0.33	3.51	1.70	0.79
		3				21.46	9.36	0.20	2.16	1.75	0.52
8	Метилловый спирт	1	33.7	5.66	51.9	35.95	1.60	0.45	10.5	1.11	1.03
		2				109.9	14.26	0.15	3.71	1.17	0.42
		3				183.5	39.59	0.09	2.24	1.18	0.28
9	Этиловый спирт	1	25.8	1.85	140	95.13	4.88	0.52	16.7	3.36	1.77
		2				288.9	42.85	0.17	7.17	4.06	1.04
		3				481.9	118.9	0.10	4.60	4.28	0.72
10	Пропиловый спирт	1	20.81	2.65	430	242.9	14.06	0.58	87.5	13.9	1.49
		2				745.3	123.4	0.19	34.0	15.8	0.74
		3				1244	342.3	0.12	21.1	16.3	0.48

постоянстве величин другого. Для расчета y на i -ой ступени итерации p -го шага вычислений применялось выражение (4), тогда как для расчета значений n на j -ой ступени итерации q -го шага вычислений использовалось выражение (8). Поиск искоемых резонансных значений y и n завершался при выполнении условия $|y_i - y_{i-1}| \ll \delta$, где y_i, y_{i-1} - значения y на i -ом и $(i-1)$ -ой ступени итерации; δ - допустимая величина ошибки в расчете y .

По найденным таким образом значениям y, n производился расчет искоемых резонансных величин длины волны λ_0 , толщины l_0 слоя, диэлектрической проницаемости ϵ' , диэлектрических потерь ϵ'' и относительной

полосы поглощения волн $\frac{1}{\rho_T} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ с применением уравнений (6) - (10).

Разработанный алгоритм был применен для нахождения спектральных характеристик безотражательного поглощения микроволн некоторых полярных жидкостей, для которых по данным работы [6] имеются необходимые для расчета экспериментальные данные о их стати-

ческих и динамических диэлектрических характеристик. (см. таблицу). С ростом номера N нулевого минимума функции $\rho(l)$ увеличение резонансной длины волны λ_0 синхронизировано соответствующим увеличением толщины l_0 отражающего слоя жидкости для низкочастотной ветви спектра. В случае высокочастотной ветви спектра, увеличение l_0 с ростом N сопровождаются соответствующим уменьшением величины λ_0 . Характерной особенностью избирательного поглощения волн является возможность, в виду малости величины ϵ_0 рождения спектра частот при малых значениях N слабополярных жидкостей (хлороформ, хлорбензол, анизол), а также снижение полосы поглощения $\Delta\lambda/\lambda_0$ с ростом номера N нулевого минимума функции ρ и увеличение диэлектрической проницаемости материала покрытия. Проведенные исследования показывают на допустимость использования полярных диэлектриков в качестве материала неотражающих поглотителей микроволн.

Очевидно, что применение полярных жидкостей в качестве поглотителей микроволн не всегда технически возможно. В этой связи предпочтение следует отдать

таким поглотителям, в которых полярная жидкость используется в качестве наполнителя твердотельного покрытия. Такая система, содержащая капсулированные жидкие включения малого объема, обеспечила бы необходимую ее конструктивную жесткость. Кроме того,

регулируемостью концентрации полярного компонента в такой гетерогенной системе можно подбирать условие его полного поглощения для заданной частоты излучения.

- [1] Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваев
Материалы, поглощающие СВЧ-излучение, М.: Наука, 1982, с. 164.
- [2] J. Preibner. NTZ Arch., 1989, v.11, № 4, p. 175-182.
- [3] Р.М. Касимов. Инженерно-физический журнал, 1994, т. 67, № 5-6, с. 489-492.
- [4] Р.М. Касимов, М.А. Калафи, Э.Р. Касимов, Ч.О. Кад-

- жар, Э.Ю. Сапаев.. ЖТФ, 1996, т.66, №5, с.167-171.
- [5] Р.М. Касимов. Метрология, 1987, № 7, с. 45-51.
- [6] Я.Ю. Ахадов. Диэлектрические свойства чистых жидкостей, М., 1972.
- [7] Э.Р. Касимов, М.А. Садыхов, Р.М. Касимов, Ч.О. Кад-
жар. Инженерно-физический журнал. 1999, т. 72,
№ 3, с. 737-739.

М.А. Садыхов, Е.Р. Касимов, Р.М. Касимов, Ч.О. Каджар

BƏ'Zİ POLYAR MAYELƏRİN DALĞALARININ DİSPERSİYA SAHƏSİNDƏ MİKRODALĞALI SÜALANMANIN ƏKSETDİRMƏYƏN UDULMASININ SPEKTRAL XARAKTERİSTİKALARI

Bə'zi polyar mayelərin dalğalarının spektral və faza xarakteristikalarının, həmçinin əksətdirməyən seçici udulma zolağının tədqiqinin nəticələri göstərmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, mayenin süalanma tezliyi əks olunmuş qatın qalınlığı, mayelərin dalğa udulma zolaqları, həm statik və həm də dinamik dielektrik xüsusiyyətləri arasında əlaqə mövcuddur. Polyar maye əsasında ucuz və texnoloji ifrat yüksək tezlikli süalanma uducularının yaradılması üçün istifadə imkanlarının əsasları verilmişdir.

М.А. Садыхов, Е.Р. Касимов, Р.М. Касимов, Ч.О. Каджар

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF NONREFLECTING ABSORPTION OF MICROWAVE RADIATION OF SOME POLAR LIQUIDS

The results of research of the spectral and spatial characteristics, and also band of nonreflecting selective absorption of waves of some polar liquids are given. The connection between frequency of radiation, thickness of a reflecting layer of a liquid, band of absorption of waves static and dynamic dielectric properties of liquids is established. The opportunities of use of polar liquids for creation on their basis cheap absorbers of microwave radiation are given.