

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Ч.О. КАДЖАР, С.Р. КАСИМОВА

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

Предложен метод изучения диэлектрических свойств жидкостей, слабопоглощающих в диапазоне микроволн. Он основан на определении коэффициентов стоячей волны при толщинах слоев жидкости, при которых минимальны отражения волны, а условия их реализации близки к условиям возникновения в слое вещества полного безотражательного поглощения падающего излучения.

Исследования молекулярного строения слабополярных жидкостей, разведенных растворов дипольных молекул и ряда других слабопоглощающих микроволновое излучение объектов по их диэлектрическим свойствам, в настоящее время, носят ограниченный характер из-за отсутствия достаточно точных и надежных методов изучения последних. Рассматриваемые объекты, как правило, имеют значения тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$, лежащие в интервале 0.01 – 0.2 единиц и поэтому определение их диэлектрической проницаемости ε' и диэлектрических потерь ε'' резонансными методами затруднено из-за низкой добротности реализуемой резонансной системы [1]. С другой стороны, не всегда возможно использование широко практикуемых методов измерения ε' , ε'' , основанных на анализе характера изменения отраженного излучения в зависимости от регулируемой толщины слоя вещества [2,3]. В соответствии с этими методами определяют длину волны λ_d в веществе и его фактор диэлектрических потерь y по данным измерения толщины l слоя вещества и коэффициента стоячей волны η в точках экстремумов его зависимости от l . Полученные таким образом λ_d и y используются затем для нахождения искомого ε' и ε'' по известным формулам

$$\varepsilon' = p + n^2 (1 - y^2) ; \varepsilon'' = 2n^2 y \quad (1)$$

где $n = (\lambda/\lambda_d)$ - коэффициент преломления вещества; $p = (\lambda/\lambda_0)^2$; λ - длина волны в свободном пространстве; λ_0 - критическая длина волны, определяемая размерами направляющей системы [1].

Указанные методы достаточно трудоемки, требуют учета влияния на результаты измерения паразитного отражения, а также учета систематических ошибок, существующих из-за использования приближенных расчетных уравнений. Их применение оправдано для изучения диэлектрических свойств жидкостей со средними значениями диэлектрических потерь. В случае слабого затухания излучения ухудшается точность измерения из-за возрастания систематических ошибок в определении λ_d и y , а также использования при вычислении y значений η в точках максимумов функции $\eta(l)$. Одним из возможных путей решения задачи измерения ε' , ε'' слабопоглощающих жидкостей этими методами является использование строгих аналитических уравнений связи искомого и измеряемых параметров, выбор в качестве информативных параметров значения l и η в минимальных точках зави-

симости η от l , а также поиск иных закономерностей в поведении функции $\eta(l)$ в условиях малости величины y .

Точные аналитические уравнения связи между искомыми ε' , ε'' , λ_d , y и измеряемыми значениями l и η в экстремальных точках зависимости $\eta(l)$ даны в работе [3]. При заметном затухании волны в веществе они упрощаются и приводятся к приближенным уравнениям, используемым, например, в известном методе Поли-Малова [1,2]. В работах [3,4] было обращено внимание на то, в поведении функции $\eta(l)$ слабопоглощающих веществ обнаруживаются нормальные и аномальные области в ее ходе (см. рис.). В нормальной области функ-

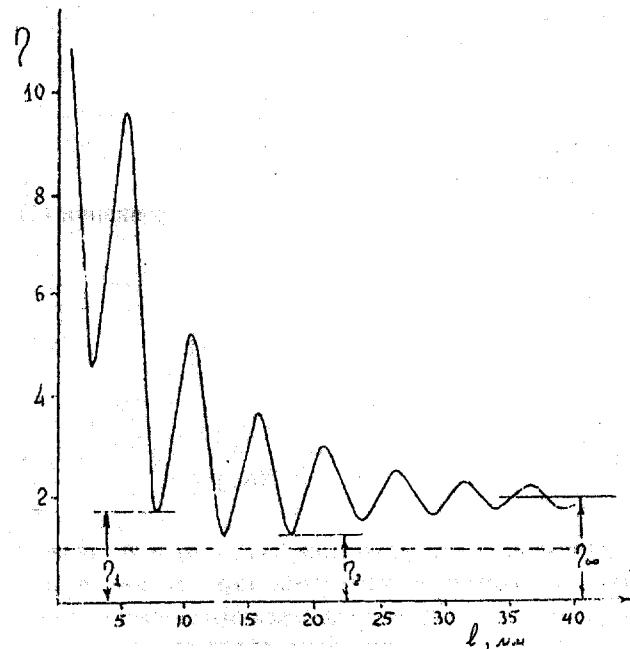


Рис. Зависимость коэффициента стоячей волны η от толщины l отражающего слоя 1.75 % раствора формамида в диоксане при длине волны $\lambda = 1.5$ см и температуре 20°C (фактор диэлектрических потерь $y = 0.06$).

ции $\eta(l)$ уменьшение максимальных величин η с ростом толщины l слоя сопровождается увеличением минимальных величин η до тех пор, пока они не достигнут своего предельного значения η_∞ . В отличие от нее в аномальной области функции $\eta(l)$, возникающей в ее начальной части при пониженных значениях y , с ростом l

происходит одновременное уменьшение как максимальных, так и минимальных значений η . Характерной особенностью функции $\eta(l)$ у таких объектов измерения является то, что граница между ее аномальной и нормальной областями зависит от фактора диэлектрических потерь y . С уменьшением величины y граница смещается в сторону больших l . В работе [4] показано, что существуют строго определенные значения λ_d и y , при которых границей оказывается один из минимумов функции $\eta(l)$. В этом, так называемом нулевом минимуме, $\eta=1$ и в системе возникает эффект полного безотражательного поглощения падающего излучения. При иных значениях λ_d и y граница раздела областей проходит между соседними минимумами функции $\eta(l)$; при этом значения этих минимумов не достигает единичных величин.

Принимая во внимание найденные в [3,4] уравнения и закономерности поведения функции $\eta(l)$, нами предложен метод определения диэлектрических свойств слабопоглощающих жидкостей. Он базируется на экспериментальном нахождении границы раздела аномальной и нормальной областей функции $\eta(l)$ и использовании в последующих расчетах данных измерения l и η минимальных точек функции, находящихся по координате l по обе стороны от этой границы. Экспериментально граница фиксируется вблизи некоторого N_0 минимума η , y

которого величина η является наименьшей по сравнению со всеми остальными минимумами той же функции.

В соответствии с предлагаемым методом выбираются два близлежащих к N_0 минимума η , лежащих, соответственно, в аномальной ($N_1=N_0-1$) и в нормальной ($N_2=N_0+1$) областях функции $\eta(l)$. Согласно данным работы [3], значения l_1, l_2 и η_1, η_2 в этих точках минимумов определяются уравнениями

$$\frac{l_1}{\lambda_b} = \frac{(1+y^2)x_1}{\sqrt{R_{11}R_{12}}}; \quad \frac{l_2}{\lambda_b} = \frac{(1+y^2)x_2}{\sqrt{R_{21}R_{22}}}, \quad (2)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\eta_0} \operatorname{cth} 2\pi x_1 y; \quad \eta_2 = \eta_0 \operatorname{th} 2\pi x_2 y, \quad (3)$$

где $R_{11}=\operatorname{th} 2\pi x_1 y - y \operatorname{tg} 2\pi x_1$; $R_{12}=\operatorname{cth} 2\pi x_1 y + y \operatorname{ctg} 2\pi x_1$; $R_{21}=\operatorname{th} 2\pi x_2 y - y \operatorname{tg} 2\pi x_2$; $R_{22}=\operatorname{cth} 2\pi x_2 y + y \operatorname{ctg} 2\pi x_2$; $\lambda_b = \lambda/\sqrt{1-p}$ - длина волны в пустой направляющей системе; $x_1=(2N_1-1)/4+\Delta_1$; $x_2=(2N_2-1)/4+\Delta_2$.

Входящие в уравнения (2) и (3) величины Δ_1, Δ_2 определены следующими выражениями

$$\Delta_1 = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg}(B \operatorname{cth} 2\pi x_1 y); \quad \Delta_2 = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg}(B \operatorname{cth} 2\pi x_2 y); \quad (4)$$

$$B = \frac{\sqrt{1+4A^2}-1}{2A}; \quad A = \frac{y}{(1+y^2)^2 n^2 - (1-y^2)}$$

Из совместного решения обеих пар уравнений (2) и (3) вытекает, что

$$\lambda_d = \frac{l_2 - l_1}{1 - (\Delta_1 - \Delta_2)}; \quad (5)$$

$$\eta_1 \eta_2 = \frac{\operatorname{th} 2\pi x_2 y}{\operatorname{th} 2\pi x_1 y}. \quad (6)$$

Входящие в эти уравнения l_1, l_2, η_1 и η_2 являются экспериментально измеряемыми параметрами и могут быть использованы для расчета искомых величин λ_d и y .

$$y_0 = \frac{\ln[(1+n)^2 + n^2 y^2] - \ln[(1-n)^2 + n^2 y^2]}{\pi(2N_0 - 1) + 4\pi\Delta}, \quad (7)$$

где: $4\pi\Delta = \frac{2ny}{n^2(1+y^2) - 1}$

Нахождение λ_d на k -ом шаге итерации производилось по уравнению (5) с использованием в нем значений Δ_1 и Δ_2 , вычисленных по λ_d и y , определенных на предыдущем $(k-1)$ -ом шаге итерации. Для вычисления y на

Алгоритм решения этих уравнений относительно λ_d и y сводится к итерационной процедуре последовательного нахождения одного из искомых параметров при постоянстве другого. В качестве исходного значения λ_{d0} на первом шаге итерации принималась его приближенная величина, вычисляемой по уравнению (5) при условии $\Delta_1=\Delta_2=0$. В качестве исходного значения для y принималась его резонансная величина y_0 , соответствующей при известном λ_d выполнению условия безотражательного поглощения волны при найденном в эксперименте номере N_0 наименьшего минимума функции $\eta(l)$. Согласно [4], ее величина находилась итерационным способом решения следующего уравнения

k -ом шаге итерации применялось уравнение, получаемое трансформацией исходного уравнения (6) относительно y .

$$y = \frac{1}{4\pi x_2} \ln \frac{1 + \eta_1 \eta_2 \operatorname{th} 2\pi x_1 y}{1 - \eta_1 \eta_2 \operatorname{th} 2\pi x_1 y} \quad (8)$$

Так как $\eta_1 \eta_2 > 1$, то при данной форме представления уравнения (6) обеспечивается достаточно быстрая сходимость вычислений y . Итерационная процедура нахождения λ_d и y завершается при выполнении условий

$$|\lambda_{dk} - \lambda_{dk-1}| \leq \delta_0 ; |y_k - y_{k-1}| \leq \delta_0 , \quad (9)$$

где δ_0 – заданная точность расчета λ_d и y ; $\lambda_{dk}, \lambda_{dk-1}, y_k, y_{k-1}$ – значения на k -ом и $(k-1)$ -ом шагах итерации.

Обобщенный алгоритм решения задачи нахождения диэлектрических коэффициентов слабопоглощающих жидкостей по рассматриваемому методу реализуется в следующей последовательности:

1. Ввод в ЭВМ экспериментальных значений $N_0, l_1, l_2, \eta_1, \eta_2$, длины волны λ и критической длины волны λ_c , а также величины допустимой точности расчета δ_0 искомого параметров λ_d и y .
2. Нахождение начальной величины λ_{d0} по уравнению (5) при условии $\Delta_1 = \Delta_2 = 0$.

3. Нахождение начальной величины y_0 итерационным решением уравнения (7) при известном λ_{d0} и N_0 .
4. Нахождение искомого значения y итерационным решением по уравнению (8).
5. Нахождение Δ_1 и Δ_2 по уравнениям (4).
6. Нахождение искомого значения λ_d по уравнению (5).
7. Нахождение искомого значения y итерационным решением по уравнению (8).
8. Возврат к пункту 5 при невыполнении условий (9).
9. Нахождение значений ϵ' и ϵ'' по уравнениям (1).
10. Вывод на печать искомого значений λ_d, y, ϵ' и ϵ'' .

Разработанный на основе данного алгоритма программный модуль реализован на языке Excell и применен для вычислений диэлектрических коэффициентов разведенных растворов дипольных молекул воды, амидов и других полярных жидкостей.

- [1] Я.Ю. Ахадов. Диэлектрические свойства чистых жидкостей, М. Стандарты, 1972, с. 412.
- [2] J.Ph. Poley. Appl. Sci. Res, 1955, v. B4, № 5, p.337.
- [3] P.M. Касимов. Метрология, 1987, № 7, с.45.

- [4] Э.Р. Касимов, С.Т. Азизов, Р.М. Касимов, Ч.О. Каджар. Известия АН Азербайджана, сер. физ.-техн. и мат. наук, 1995, № 5-6, с.22.

Ç.O. Qacar, S.R. Qasimova

ZƏİF UDUCU MAYELƏRİN DİELEKTRİK XASSƏLƏRİNİN MİKRODALĞADA ÖLÇÜLMƏSİNDƏ ELEKTROMAQNİT ŞÜALARININ TAM UDMA EFFEKTİNDƏN İSTİFADƏ EDİLMƏSİ

Mikrodalğa diapazonunda zəif uducu mayelərin dielektrik xassələrini ölçmə metodu təklif olunub. Həmin metod düşən şüaların tam udma şəraiti yaxınlığında, dalğanın əksətmə minimumu alınan yerdə, durğun dalğa əmsalı qiymətinin təcrübi tə'yininə əsaslanmışdır.

Ch.O. Kadjar, S.R. Kasimova

THE APPLICATION OF EFFECT OF NONREFLECTIVE ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION AT THE MICROWAVE MEASUREMENTS OF DIELECTRIC CONSTANTS OF LIQUIDS WITH LOW ABSORPTION

The method of measurement of the dielectric constants of liquids with low absorption in microwave range is proposed. The method is based on determination of standing wave coefficient at thickness of liquid layers, at which wave reflection is minimal and the conditions of its realization are close to conditions of appearance of nonreflective absorption of wave in liquids.