

# ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЛАБОПОГЛОЩАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Ч.О. КАДЖАР, С.Р. КАСИМОВА

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

Показано, что ввод в измерительную цепь трансформатора сопротивлений в виде системы из непоглощающих четвертьволновых плоских пластин расширяет диапазон применимости метода определения диэлектрических свойств слабопоглощающих жидкостей, основанного на анализе поля стоячей волны при толщинах слоя вещества, при которых наиболее близки или выполнимы условия полного безотражательного поглощения падающего излучения.

В работе [1] был предложен метод измерения диэлектрических свойств жидкостей, слабопоглощающих в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Он основан на использовании явления полного безотражательного поглощения падающего излучения, которое может иметь место в таких жидкостях при определенных значениях толщин  $l$  слоя, диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и диэлектрических потерь  $\epsilon''$  жидкости [2]. Метод допускает возможность измерения  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  жидкостей со значением тангенса угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon' < 0.1$  единиц; при этом процедура определения  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  сводится к снятию экспериментальной зависимости коэффициента стоячей волны  $\eta$  от толщины  $l$  слоя жидкости, нахождению  $N_0$ -го наименьшего по величине минимума  $\eta$ , определяющего границу между аномальной и нормальной областями функции  $\eta(l)$ , и измерению величин  $\eta_m$  и  $l_m$  у двух близлежащих минимумов  $\eta$ , расположенных по координате  $l$  по обе стороны от границы раздела этих двух областей. Положение  $N_0$ -го минимума функции  $\eta(l)$  зависит от величины  $\operatorname{tg} \delta$  и с уменьшением последней оно смещается в область высоких значений толщин  $l$  слоя исследуемой жидкости. По этой причине при измерениях  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  жидкостей со значениями  $\operatorname{tg} \delta < 0.01$  и менее создаются определенные технические трудности, связанные с ограниченностью длины используемых измерительных ячеек. Чтобы расширить применимость рассматриваемого метода и на случай измерения свойств жидкостей с такими значениями  $\operatorname{tg} \delta$ , предложено использовать вводимый в цепь измерения трансформатор сопротивлений с коэффициентом трансформации  $k < 1$ . В общем случае трансформатор представляет набор четвертьволновых плоских пластин из непоглощающих материалов. Его коэффициент трансформации  $k$  равен

$$k = \frac{(\epsilon_1 - p)(\epsilon_3 - p) \cdot (\epsilon_{i-1} - p)}{(\epsilon_2 - p)(\epsilon_4 - p) \cdot (\epsilon_i - p)}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_i$  — значения диэлектрических проницаемостей материала пластин, последовательно расположенных у поверхности исследуемой жидкости;  $p = \lambda/\lambda_0$ ;  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве;  $\lambda_0$  — критическая длина волны, определяемая размерами используемой направляющей системы [3].

При наличии трансформатора сопротивлений между регулируемым слоем измеряемой жидкости и воздушной частью направляющей системы модуль коэффициента отражения волны  $\rho$  от такой слоистой системы равен

$$\rho = \frac{\left| kZ \operatorname{th} [i2\pi(1 - iy)l / \lambda_d] - Z_0 \right|}{\left| kZ \operatorname{th} [i2\pi(1 - iy)l / \lambda_d] + Z_0 \right|}, \quad (2)$$

где  $\rho = (\eta - 1) / (\eta + 1)$ ;  $Z_0, Z$  — волновые сопротивления направляющей системы, заполненной, соответственно, воздухом и исследуемой жидкостью;  $\lambda_d$  — длина волны в направляющей системе, заполненной исследуемой жидкостью;  $y = \operatorname{tg} \Delta / 2$ ;  $\Delta = \arctg \epsilon'' / (\epsilon' - p)$  [3].

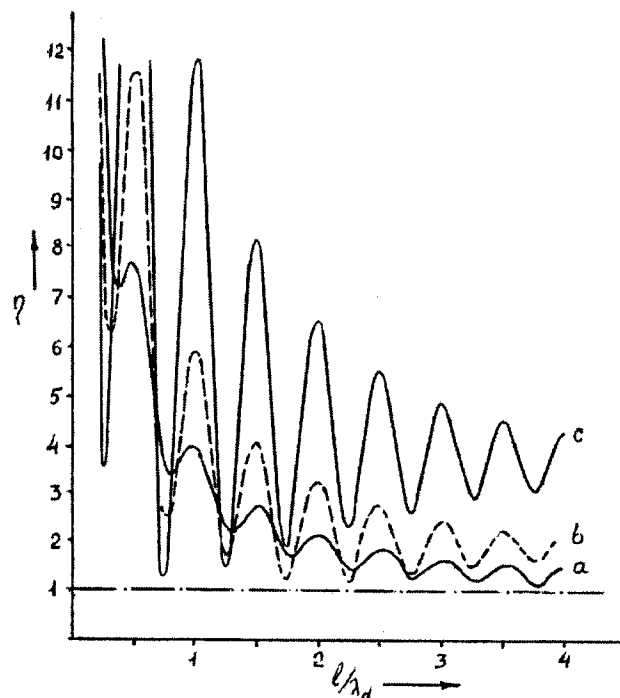


Рис. Зависимости коэффициентов стоячей волны  $\eta$  от толщины  $l$  отражающего слоя слабопоглощающей жидкости со значениями  $\epsilon' = 2.50$ ,  $\epsilon'' = 0.20$  при коэффициентах трансформации  $k$  равными 1.5 (а), 1.0 (б) и 0.5 (с). Длина волны  $\lambda = 1.5$  см. Критическая длина волны волноводного тракта 2.3 см.

Исследования поведения зависимости  $\eta$  от  $l$  при малых значениях фактора диэлектрических потерь  $y$  показали, что граница раздела между аномальной и нормальной областями функции  $\eta(l)$  существенно зависит при заданных значениях  $\varepsilon', \varepsilon''$  исследуемой жидкости от величины коэффициента трансформации  $k$ . С увеличением  $k$  граница смещается в сторону высоких значений  $l$  и реализуется при повышенных величинах  $N_0$  по сравнению с величиной  $N_0$  при  $k = 1$ . Обратная картина наблюдается при использовании трансформатора сопротивлений с  $k < 1$  (см. рис.). Таким образом, ввод в цепь измерения трансформатора сопротивлений с  $k < 1$  приближает измеряемую границу раздела аномальной и нормальной областей зависимости  $\eta(l)$  слабопоглощающих жидкостей и, в этой связи, делает возможным ее наблюдение в заданном интервале варьирования толщины слоя вещества, а следовательно, позволяет расширить диапазон применимости разработанного в [1] метода при измерениях диэлектрических свойств слабопоглощающих жидкостей с пониженными значениями  $\operatorname{tg} \delta$ . Такой трансформатор сопротивлений может быть сформирован из системы пластин, в которой материалы четных номеров пластин имели бы более высокие значения диэлектрических проницаемостей по сравнению с нечетными номерами пластин. Наиболее технически легко реализуем и

удобен в эксплуатации трансформатор сопротивлений, у которого все пластины с четными номерами выполнены из одного и того же материала, а пластины с нечетными номерами заменены их воздушными аналогами. При числе диэлектрических пластин  $m$  в системе ее коэффициент трансформации будет равен  $k = [(1-p) / (\varepsilon-p)]^m$ , где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала пластин.

Следует отметить, что при обратном расположении такого трансформатора сопротивлений по отношению к измеряемому объекту его коэффициент трансформации будет больше 1. В этом случае его можно при определенных допущениях использовать и при измерениях  $\varepsilon', \varepsilon''$  сильнопоглощающих веществ, у которых в отсутствии трансформатора сопротивлений из-за сильного затухания волны в слое вещества наблюдаются ограниченной число удобных для измерений экстремумов функции  $\eta(l)$ .

При наличии в цепи измерения трансформатора сопротивлений имеем с учетом данных работы [4], что значения  $l_1, l_2$  и  $\eta_1, \eta_2$  у двух близлежащих к  $N_0$  минимумов  $\eta$ , лежащих соответственно в аномальной ( $N_1 = N_0 - 1$ ) и в нормальной ( $N_2 = N_0 + 1$ ) областях функции  $\eta(l)$  определяются уравнениями

$$l_1 / \lambda_d = (2N_1 - 1) / 4 + \Delta_1 ; \quad l_2 / \lambda_d = (2N_2 - 1) / 4 + \Delta_2 \quad (3)$$

$$\eta_1 = \frac{1}{\eta_\infty} \operatorname{cth} 2\pi x_1 y ; \quad \eta_2 = \eta_\infty \operatorname{th} 2\pi x_2 y ; \quad \eta_\infty = (1 + \rho_\infty)(1 - \rho_\infty) \quad (4)$$

где 
$$\Delta_1 = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg}(B\eta_1\eta_\infty) ; \quad \Delta_2 = \frac{1}{2\pi} \operatorname{arctg}(B\eta_\infty / \eta_2) \quad (5)$$

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

$\eta_\infty, \rho_\infty$  – соответственно, коэффициенты стоячей волны и отражения волны при бесконечной толщине слоя жидкости;  $n = (\lambda_b / \lambda_d)$  – коэффициент преломления вещества в направляющей системе;  $\lambda_b = \lambda / \sqrt{1 - p}$  – длина волны в пустой направляющей системе [3,4].

Входящие в уравнения (3) – (5) значения  $n$  и  $y$  связаны с искомыми величинами  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  известными выражениями

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

Полученная система уравнений при  $k = 1$  совпадает с системой уравнений, рассмотренной в предыдущей нашей работе [1]. При  $k \neq 1$  она отличается выражениями для  $A$  и  $\rho_\infty$ , в которые входит в качестве параметра величина  $k$ .

Из совместного решения уравнений (3) и (4) вытекает, что

$$n = \lambda_b \frac{1 + (\Delta_2 - \Delta_1)}{l_2 - l_1} ; \quad (7)$$

$$y = \frac{\ln[(\eta_\infty + \eta_2) / (\eta_\infty - \eta_2)] - \ln[(\eta_\infty \eta_1 + 1) / (\eta_\infty - \eta_1)]}{4\pi[1 + (\Delta_2 - \Delta_1)]} \quad (8)$$

Входящие в уравнения (7),(8)  $l_1, l_2, \eta_1$  и  $\eta_2$  являются экспериментально измеряемыми параметрами и используются для расчета  $n$  и  $y$ , а по ним – величин  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ . Алгоритм решения этих уравнений относительно  $n$  и  $y$

аналогичен используемому в [1] и сводится к итерационной процедуре последовательного нахождения одного из искомых параметров при постоянстве другого.

- [1] Ч.О. Каджар, С.Р. Касимова. Fizika, 2000, т. 6, № 2, с. 41.  
[2] 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 .

- [3] А.И. Харвей. Техника сверхвысоких частот, М. Сов. Радио, 1965.  
[4] Р.М. Касимов. Метрология, 1987, № 7, с. 42.

Ç.O. Qacar, S.R. Qasimova

## ZƏİF UDUCU MAYELƏRİN DİELEKTRİK ƏMSALININ MİKRODALĞADA ÖLÇÜLMƏSİNDƏ MÜQAVİMƏT TRANSFORMATORUNUN İSTİFADƏ EDİLMƏSİ

Göstərilmişdir ki, zəif uducu mayelərin dielektrik xassələrinin ölçülməsində düşən şüaların tam udma şəraiti yaxınlığında, durğun dalğa əmsalı qiymətinin təcrübi tə'yinine əsaslanmış üsulunun təkmilləşməsi məqsədilə ölçmə zəncirində udmayan dördüncü bir dalğah yastı laylı sistem kimi müqavimətlərin transformatoru istifadə edilir.

Ch.O. Qajar, S.R. Kasimova

## THE APPLICATION OF RESISTANCE TRANSFORMER AT MICROWAVE MEASUREMENTS OF DIELECTRIC COEFFICIENTS OF WEAKLY ABSORBING LIQUIDS

It was shown that input in measurement chain of resistance transformer in the form of the system from non-absorbing quarter wave plates extends the diapason of application of determination method of dielectric properties weakly absorbing liquids based on analysis of standing wave field at thickness of substance layer at which the conditions of full non-reflective absorption of radiation are carried out.