

**УСЛОВИЯ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОДЛОЖКИ ПРИ ПАДЕНИИ  
НА НЕЕ ПОД УГЛОМ ПОПЕРЕЧНО-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ**

**С.Р.КАСИМОВА**

*Институт Физики НАН Азербайджана  
370143, Баку, пр. Г.Джавида, 33*

Найдены условия возникновения полного безотражательного поглощения поперечно-поляризованной электромагнитной волны при ее падении под углом на поглощающую подложку бесконечной толщины с нанесенным на нее слоем непоглощающего диэлектрика. Исследуются их зависимость от толщины слоя просветляющего покрытия, угла падения волны и диэлектрических свойств материала подложки и покрытия.

Известно, что при нормальном падении плоскополяризованной электромагнитной волны на плоский слой непоглощающего вещества, нанесенного на поглощающую подложку бесконечной толщины, в последней может возникать эффект полного поглощения падающего излучения [1]. Такое безотражательное поглощение падающего излучения носит спектральный характер и проявляется в области дисперсии вещества подложки при строго определенных избирательных значениях частоты излучения и толщины слоя покрытия [2]. Представляет практический интерес исследование этого эффекта при падении плоскополяризованной волны под углом на указанную двухслойную систему.

В этой связи рассмотрим теоретически условия возникновения полного поглощения излучения при его падении под углом  $\alpha_0$  к поверхности плоского слоя непоглощающего диэлектрика, нанесенного на поглощающую подложку бесконечной толщины. Толщина  $l$  слоя покрытия регулируема, а вещество подложки имеет комплексное значение диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ , где  $\varepsilon'$  – его диэлектрическая проницаемость и  $\varepsilon''$  – диэлектрические потери. При этом с учетом положения вектора электрической напряженности  $E$  волны по отношению к плоскости ее падения будем различать случаи отражения параллельно-поляризованной (волна типа ТН) и поперечно-поляризованной (волна типа ТЕ) волны соответственно, когда вектор  $E$  параллелен или перпендикулярен плоскости падения волны. В качестве начального шага ограничимся случаем отражения от такой двухслойной системы поперечно-поляризованной волны.

Для данного типа поляризации падающей волны комплексное выражение коэффициента отражения волны  $\rho$  рассматриваемой плоской двухслойной системы равно

$$\rho = \frac{Z_d \cos \alpha_0 - Z_0 \cos \alpha_1}{Z_d \cos \alpha_0 + Z_0 \cos \alpha_1}, \quad (1)$$

где  $Z_0$  – волновое сопротивление вакуума,  $\cos \alpha_0 = \sqrt{1-p}$ ,  $\cos \alpha_1 = \sqrt{1-p/\varepsilon_1}$ ,  $p = \sin^2 \alpha_0$ ,  $\alpha_1$  – угол преломления волны в материале покрытия,  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость вещества покрытия [3].

Входящее в уравнение (1) входное сопротивление  $Z_d$  системы покрытие-подложка определяется выражением:

$$Z_d = Z_1 \frac{Z \cos \alpha_1 + Z_1 \cos \alpha_2 \operatorname{th}(\gamma l \cos \alpha_1)}{Z_1 \cos \alpha_2 + Z \cos \alpha_1 \operatorname{th}(\gamma l \cos \alpha_1)}, \quad (2)$$

где  $Z_1$ ,  $Z$  – волновые сопротивления соответственно материалов покрытия и

подложки,  $\cos \alpha_2 = \sqrt{1 - p/\varepsilon}$ ,  $\gamma = i2\pi\sqrt{\varepsilon_1}/\lambda$  – постоянная распространения волны в материале покрытия,  $\alpha_2$  – угол преломления волны в веществе подложки,  $\lambda$  – длина волны падающего излучения.

Безотражательному поглощению волны в рассматриваемой слоистой системе соответствует условие

$$Z_d = Z_0 \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_0}. \quad (3)$$

Поскольку  $Z_1 = Z_0/\sqrt{\varepsilon_1}$ ,  $Z = Z_0/\sqrt{\varepsilon}$ , с учетом выражения (2) имеем

$$\frac{\sqrt{\varepsilon_1 - p} + i\sqrt{\varepsilon - p} \operatorname{tg} 2\pi x}{\sqrt{\varepsilon - p} + i\sqrt{\varepsilon_1 - p} \operatorname{tg} 2\pi x} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 - p}{1 - p}}, \quad (4)$$

где  $x = \frac{l}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_1 - p}$ .

Входящие в уравнение (4) величины  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  и  $\varepsilon_1$  связаны с коэффициентом преломления  $n$  и фактором диэлектрических потерь  $y$  подложки и коэффициентом преломления  $n_1$  покрытия известными соотношениями

$$\varepsilon' = n^2(1 - y^2), \quad \varepsilon'' = 2n^2 y, \quad \varepsilon_1 = n_1^2, \quad (5)$$

где  $n = \lambda/\lambda_d$ ,  $n_1 = \lambda/\lambda_{1d}$ ,  $y = \operatorname{tg} \delta/2$ ,  $\delta = \operatorname{arctg} \varepsilon''/\varepsilon'$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_{1d}$  – длина волны соответственно в веществе подложки и покрытия.

Для удобства дальнейшего рассмотрения введем обозначения

$$\bar{\varepsilon}' = \frac{\varepsilon' - p}{1 - p}, \quad \bar{\varepsilon}'' = \frac{\varepsilon''}{1 - p}, \quad \bar{\varepsilon}_1 = \frac{\varepsilon_1}{1 - p}, \quad (6)$$

в которых  $\bar{\varepsilon}'$ ,  $\bar{\varepsilon}''$ ,  $\bar{\varepsilon}_1$  по аналогии с выражениями (5) представимы в виде

$$\bar{\varepsilon}' = \bar{n}^2(1 - \bar{y}^2), \quad \bar{\varepsilon}'' = 2\bar{n}^2 \bar{y}, \quad \bar{\varepsilon}_1 = \bar{n}_1^2, \quad (7)$$

где  $\bar{n} = \lambda/\bar{\lambda}_d$ ,  $\bar{n}_1 = \lambda/\bar{\lambda}_{1d}$ ,  $\bar{y} = \operatorname{tg} \bar{\delta}/2$ ,  $\bar{\delta} = \operatorname{arctg} \bar{\varepsilon}''/\bar{\varepsilon}'$ ,  $\bar{\lambda} = \lambda/\sqrt{1 - p}$ ,  $\bar{\lambda}_d$ ,  $\bar{\lambda}_{1d}$  – длина волны соответственно в веществе подложки и покрытия при распространении волны под заданным углом к ограничивающим их плоским поверхностям.

Используя эти обозначения в уравнении (4), получим после преобразований

$$\operatorname{th}(\alpha + i\beta + i2\pi x) = 1/\bar{n}_1, \quad (8)$$

где параметры  $\alpha$  и  $\beta$  определяются из решения уравнения

$$\operatorname{th}(\alpha + i\beta) = \bar{n}/\bar{n}_1(1 - i \cdot \bar{y}). \quad (9)$$

Разделим уравнения (8), (9) на мнимые и вещественные части, получим

$$\bar{y} = \frac{1}{\bar{n}} \sqrt{(\bar{n} - 1)(\bar{n}_1^2 - \bar{n})}, \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} 4\pi x = \frac{2\bar{n}\bar{n}_1\bar{y}}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2(1 + \bar{y}^2)}. \quad (11)$$

Поскольку условия просветления поглощающей подложки выполняются при толщине слоя покрытия близких к величинам кратным  $\bar{\lambda}_{1d}/4$ , примем

$$x = \frac{2N_0 - 1}{4} + \Delta, \quad (12)$$

где  $N_0 = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\Delta$  – в случае поглощающей подложки малая, но не нулевая величина, определяемая из совместного решения уравнений (11) и (12)

$$\Delta = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\bar{n}\bar{n}_1\bar{y}}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2(1 + \bar{y}^2)}. \quad (13)$$

С учетом соотношения для  $x$  имеем из совместного рассмотрения уравнений (12) и (13) следующее выражение для толщины слоя просветляющего покрытия

$$\frac{l_0}{\lambda} = \frac{1}{\bar{n}_1 \sqrt{1-p}} \left[ \frac{(2N_0 - 1)}{4} + \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2\bar{n}\bar{n}_1\bar{y}}{\bar{n}_1^2 - \bar{n}^2(1 + \bar{y}^2)} \right]. \quad (14)$$

Как следует из уравнения (14), при заданных избирательных значениях  $\alpha_0$ ,  $n$ ,  $y$  и  $n_1$  безотражательное прохождение волны имеет место при толщинах слоя просветляющего покрытия, отстоящих друг от друга на расстоянии  $\bar{\lambda}_{1d}/2$ . При этих значениях толщины слоя покрытия минимумы осциллирующей и незатухающей зависимостей модуля коэффициента отражения волны  $\rho$  достигают нулевой величины. В этой связи входящий в уравнения (12) и (14) целочисленный параметр  $N_0$  указывает на порядковый номер соответствующего нулевого минимума  $\rho$ .

Если материал подложки не поглощает излучение, то  $y=0$ ,  $\Delta=0$ ,  $l_0=\lambda_d/4$  и  $n=n_1^2$ , что соответствуют условиям просветления прозрачных слоистых сред [4].

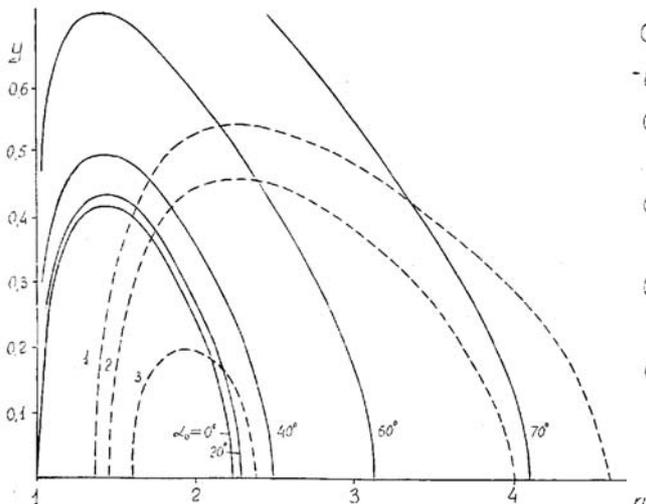


Рис.1.

Зависимости между коэффициентом преломления  $n$  и фактором диэлектрических потерь  $u$  вещества поглощающей подложки бесконечной толщины: А) при безотражательном поглощении падающей на нее под углом  $\alpha_0$  поперечнополяризованной волны при наличии у подложки нанесенного на нее просветляющего слоя покрытия с коэффициентом преломления  $n_1=1.5$ , В) при дебаевском типе дисперсии волн у ацетона (1), циклогексанона (2) и хлорбензола (3) (пунктирные линии).

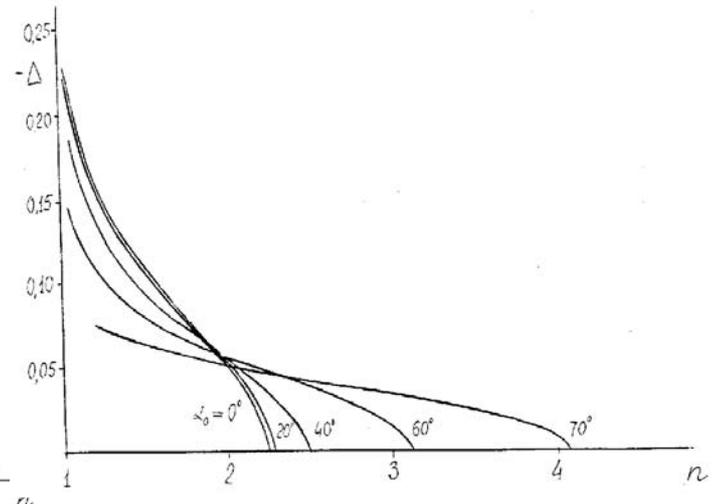


Рис.2.

Величина отклонения  $\Delta$  толщины слоя покрытия от величин кратных четверти длины волны в веществе покрытия в зависимости от коэффициента преломления  $n$  подложки и угла падения волны  $\alpha_0$  при выполнении условий полного поглощения излучения в двухслойной системе покрытие-подложка.

Полученные уравнения (10)-(14) были использованы для нахождения зависимостей между избирательными значениями  $n$ ,  $y$ ,  $n_1$  веществ подложки и покрытия, величины отклонения  $\Delta$  толщины слоя  $l_0$  от величин, кратных  $\bar{\lambda}_{1d}/4$ , длины волны излучения  $\lambda$  и угла падения волны  $\alpha_0$ , при которых выполняются условия полного поглощения электромагнитного излучения в рассматриваемой двухслойной системе. На Рис.1 и Рис.2 даны соответственно семейства зависимостей  $y$  и  $\Delta$  от  $n$  при  $n_1 = 1.5$  и различных значениях угла падения волны.

Зависимости  $y$  от  $n$  имеют параболическую форму и ее правые части пересекают ось абсцисс при значениях  $\bar{n}$  равных соответственно  $\bar{n}_1^2$ . С увеличением величины  $\alpha_0$  эти части зависимостей  $y(n)$  смещаются в область больших величин  $n$  и при достижении значения  $\alpha_0=90^\circ$  уходят в бесконечность. Как следует из Рис.1, все кривые семейства зависимостей  $y(n)$  располагаются выше ограничивающей зависимости для  $\alpha_0=0$ , которая соответствует случаю нормального падения волны. Характерно, что величина отклонения  $\Delta$  толщины просветляющего слоя от  $\bar{\lambda}_{1d}/4$  отрицательна во всем интервале изменения  $n$  и  $\alpha_0$ . При  $y=0$  она равна нулю, с уменьшением  $n$  возрастает по абсолютной величине и достигает своего предельного значения 0.25 (Рис.2).

Нахождение избирательных значений толщины просветляющего покрытия, длины и угла падения волны, при которых возникает безотражательное прохождение излучение в подложку становится возможным, если известны коэффициент преломления  $n_1$  и частотные зависимости  $n$ ,  $y$  соответственно материалов подложки. Как правило, диэлектрические свойства поглощающих диэлектриков, в частности полярных жидкостей, достаточно хорошо описываются уравнениями Дебая

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon'' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \omega\tau, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_\infty$  - соответственно статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости вещества,  $\tau$ - время релаксации,  $\omega$ - круговая частота [5].

С учетом соотношений (5) между оптическими и диэлектрическими свойствами вещества уравнение Дебая представимо в следующем виде

$$y = \frac{1}{n} \sqrt{\sqrt{4an^2 + b^2} - (n^2 + a)}, \quad (16)$$

где  $a=(\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty)/2$ ,  $b=(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)/2$ .

Решая совместно уравнения (10) и (16), можно вычислить при заданных величинах  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_\infty$ ,  $\tau$ ,  $n_1$  и  $\alpha_0$  избирательные значения  $n$  и  $y$ , а следовательно  $\lambda_0$  и  $l_0$ , при которых возникает полное поглощения падающей волны в выбранном материале подложки. Графическая иллюстрация подобного метода расчета представлена на Рис.1, где пунктирными линиями даны в координатной плоскости  $[n, y]$  вычисленные по уравнению (16) зависимости  $y(n)$  трех полярных жидкостей с известными значениями  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_\infty$ . Точки их пересечения с найденной при заданном значении  $\alpha_0$  зависимостью  $y(n)$ , определяемой уравнением (10), в конечном итоге позволяют рассчитать искомые избирательные значения  $\lambda_0$ ,  $l_0$  выбранного вещества подложки.

В Таблице приведены результаты расчета избирательных значений  $\lambda_0$ ,  $l_0$  при  $N_0=1, 2$  и  $3$  двухслойных систем, в которых в качестве вещества подложки использованы ряд полярных жидкостей с известными значениями  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_\infty$  и  $\tau$  [5]. В качестве вещества просветляющего покрытия применено вещество со значением  $n_1=1.5$ .

Выявленные условия существования безотражательного прохождения поперечно-поляризованной волны под углом к просветленной поглощающей подложки позволяют осуществить целенаправленный поиск материалов при проектировании неотражающих элементов, в частности, тепловых приемников излучения.

УСЛОВИЯ ПРОСВЕТЛЕНИЯ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОДЛОЖКИ ПРИ ПАДЕНИИ НА НЕЕ ПОД УГЛОМ ПОПЕРЕЧНО-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

**Таблица.**

Избирательные значения толщины  $l_0$  слоя просветляющего покрытия и длины волны  $\lambda_0$  падающего излучения ряда полярных жидкостей дебаевского типа при различных углах падения волны.  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_\infty$ ,  $\tau$  - соответственно статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости и время релаксации жидкости при температуре 20<sup>0</sup>С;  $N_0$  - номер нулевого минимума отраженного сигнала.

№	Жидкость	$\alpha_0$ , град	$\lambda_0$ , см	- $\Delta$	$l_0$ , см		
					$N_0=1$	$N_0=2$	$N_0=3$
1	Ацетон $\epsilon_0 = 21.2$ ; $\epsilon_\infty = 1.90$ ; $\tau = 3.01 \cdot 10^{-12}$ с	0	0.0584	0.0992	0.0059	0.0254	0.0445
		20	0.0618	0.0953	0.0065	0.0277	0.0489
		40	0.0773	0.0818	0.0096	0.0381	0.0666
		60	0.1545	0.0514	0.0251	0.0881	0.1512
		70	0.4681	0.0460	0.0911	0.2913	0.4915
2	Циклогексанон $\epsilon_0 = 16.0$ ; $\epsilon_\infty = 2.18$ ; $\tau = 10.3 \cdot 10^{-12}$ с	0	0.3038	0.0848	0.0335	0.1347	0.2360
		20	0.3222	0.0816	0.0372	0.1475	0.2577
		40	0.4072	0.0700	0.0541	0.2043	0.3545
		60	0.8687	0.0417	0.1478	0.5024	0.8570
3	Хлорбензол $\epsilon_0=5.74$ ; $\epsilon_\infty=2.55$ ; $\tau=7.0 \cdot 10^{-12}$ с	0	1.5384	0.0344	0.2212	0.7340	1.2468
		20	1.9494	0.0279	0.2965	0.9639	1.6312
4	Фенол $\epsilon_0 = 11.7$ ; $\epsilon_\infty = 3.19$ ; $\tau = 87 \cdot 10^{-12}$ с	0	0.4139	0.0525	0.0545	0.1925	0.3304
		20	0.4469	0.0511	0.0609	0.2139	0.3669
		40	0.5966	0.0453	0.0901	0.3102	0.5303
		60	1.6923	0.0226	0.3142	1.0051	1.6960

1. Р.М.Касимов, Ч.О.Каджар, С.Р.Касимова, *Прикладная физика*, № 4 (2000) 101.
2. Ч.О.Каджар, С.Р.Касимова, *Azerbaijan National Transaction of Azerbaijan Academy of Sciences, Series of Physical-mathematical and Technical sciences, Physics and Astronomy*, XXIV №5 (2004) 85.
3. J.Preisner, *NTZ Arch.*, **11** №4 (1989) 175.
4. Л.М.Бреховских, *Волны в слоистых средах*, М.:Изд.АН СССР, (1967) 502.
5. Я.Ю.Ахадов, *Диэлектрические параметры чистых жидкостей*, М.:Изд.МАИ, (1999) 856.

**ŞAQLI POLƏRİZASİYALI ELEKTROMAQNİT DALĞASININ BUJAQ ALTINDA UDAN TƏBƏQƏYƏ DUŞDÜKDƏ TƏBƏQƏNİN ŞƏFFAFLANMA ŞƏRTLƏRİ**

**S.R.QASIMOVA**

Çox qalın udan təbəqəyə çəkilmiş udmayan dielektrik layına bujaq altında düşən şaquli polarizasiya elektromagnit dalğasının tam əks olunmayan udmasının əmələqəlmə şərtləri tapılmışdır. Həmin şərtlərin şəffaflanmış örtüyün qalınlığından, dalğanın düşmə bujaqğından, örtüyün və təbəqənin maddələrinin dielektrik xassələrinə asılılığı tədqiq edilmişdir.

**THE CONDITIONS OF THE TRANSLUCENCE OF ABSORBING SUBSTRATE AT INCIDENCE UNDER THE ANGLE OF CROSS-POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVE**

**S.R.KASIMOVA**

Conditions of the full reflectionless absorption of the cross-polarized electromagnetic wave at its incidence under the angle on the have been found. Their dependencies on the thickness of layer of translucency cover, the incidence wave angle and dielectric properties of substrate material and cover have been investigated.

Редактор: Э.Гусейнов