

УДК 538.56:625.365

Выделение заданной поляризационной составляющей оптического излучения при его отражении от двухслойной системы диэлектрик—металл

Р. М. Касимов, Р. А. Карамалиев

Институт химических проблем НАН Азербайджана,
Бакинский государственный университет, г. Баку, Азербайджан
E-mail: itpcht@an.ab.az.

Найдены условия, которые обеспечивают выделение одной из двух поляризационных составляющих оптического излучения, падающего под углом на двухслойную систему диэлектрик—металл.

PACS: 41.20.-q

Введение

Исследование характеристик отражения и преломления плоских слоистых систем в настоящее время является актуальной задачей лазерной физики и когерентной оптики, которая стимулирует поиск и создание многослойных покрытий, применяемых в качестве зеркал или фильтров в оптических резонаторах [1—3].

Известно, что при нормальном падении плоской электромагнитной волны на нанесенный на металлическую подложку плоский слой поглощающего диэлектрика в последнем возможно возникновение эффекта полного или безотражательного поглощения падающего излучения при строго определенных избирательных значениях толщины слоя покрытия и частоты излучения [4]. При заданной частоте падающего излучения аналогичный эффект в подобной слоистой системе может проявляться и при избирательных толщинах слоя покрытия и углах падения волны [5]. В рассматриваемом случае эти избирательные значения при выбранном материале покрытия зависят от типа поляризации падающей волны, поэтому представляет практический интерес исполь-

зование указанного эффекта для направленного выделения одной из поляризационных составляющих падающего излучения за счет полного гашения ее другой составляющей.

Физическая модель и ее расчет

Для решения указанной задачи рассмотрим отражение плоско поляризованной электромагнитной волны, падающей под углом α_0 на плоский слой поглощающего диэлектрика, нанесенного на идеальную металлическую подложку и имеющего комплексную величину коэффициента преломления $\hat{n} = n - i\chi$, где χ — экстинкция вещества покрытия. С учетом положения вектора электрической поляризации \mathbf{E} волны по отношению к плоскости ее падения будем различать случаи отражения параллельно-поляризованной (p -поляризация) и поперечно-поляризованной (s -поляризация) волн, соответственно, когда вектор \mathbf{E} параллелен или перпендикулярен плоскости падения волны.

Комплексное значение коэффициента отражения волны \hat{R} рассматриваемой двухслойной системы представим в виде

$$\hat{R} = \frac{r_1 + r_2 \exp(-i2kl \cos \alpha)}{1 + r_1 r_2 \exp(-i2kl \cos \alpha)}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi\hat{n}/\lambda$ — волновое число;

λ — длина волны падающего излучения;

α — угол преломления волны;

l — толщина поглощающего слоя.

Входящие в уравнение (1) комплексные значения коэффициентов отражения волны r_1 и r_2 от границ раздела сред системы в зависимости от типа поляризации падающей волны равны соответственно:

$$\begin{aligned} r_1^s &= \frac{\cos \alpha_0 - \hat{n} \cos \alpha}{\cos \alpha_0 + \hat{n} \cos \alpha}; & r_2^s &= -1; \\ r_1^p &= \frac{\hat{n} \cos \alpha_0 - \cos \alpha}{\hat{n} \cos \alpha_0 + \cos \alpha}; & r_2^p &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\cos \alpha = \sqrt{1 - p/\hat{n}^2}$;

$\cos \alpha_0 = \sqrt{1 - p}$;

$p = \sin^2 \alpha_0$.

Введем обозначение

$$\bar{n} - i\bar{\chi} = \sqrt{((n - i\chi)^2 - p)/(1 - p)}$$

и преобразуем соотношение $2ikl \cos \alpha$ к следующему виду:

$$\frac{i4\pi l}{\lambda} \hat{n} \sqrt{1 - p/\hat{n}^2} = 4\pi\bar{x}\bar{y} + i4\pi\bar{x},$$

где $\bar{x} = l/\lambda_d$; $\bar{y} = \bar{\chi}/\bar{n}$;

$\lambda_d = \lambda_b/\bar{n}$; $\lambda_b = \lambda/\sqrt{1 - p}$;

$y = \chi/n$ — фактор диэлектрических потерь вещества покрытия;

λ_b, λ_d — длина волны в воздухе и в веществе покрытия по направлению распространения волны.

С учетом приведенных обозначений уравнения Френеля (2) для комплексных значений коэффициентов отражения волны r_1 от поверхности поглощающего слоя при падении под углом принимают вид:

$$r_1^s = \frac{1 - \bar{n}(1 - i\bar{y})}{1 + \bar{n}(1 - i\bar{y})}; \quad r_1^p = \frac{n^2(1 - iy)^2 - \bar{n}(1 - i\bar{y})}{n^2(1 - iy)^2 + \bar{n}(1 - i\bar{y})}. \quad (3)$$

В частном случае нормального падения волны на поверхность слоя покрытия $\bar{n} = n$, $\bar{y} = y$ и уравнения (3) имеем:

$$r_1^s = \frac{1 - n(1 - iy)}{1 + n(1 - iy)} = -r_1^p.$$

Условиям полного поглощения s - и p -волн в рассматриваемой системе диэлектрик—металл соответствуют следующие уравнения:

$$\exp(4\pi\bar{x}\bar{y} + i4\pi\bar{x}) = \frac{1 + (\bar{n} - i\bar{\chi})}{1 - (\bar{n} - i\bar{\chi})} \quad \text{— для } s\text{-волны}; \quad (4)$$

$$\exp(4\pi\bar{x}\bar{y} + i4\pi\bar{x}) = \frac{(\bar{n} - i\bar{\chi}) + (n - i\chi)^2}{(\bar{n} - i\bar{\chi}) - (n - i\chi)^2} \quad \text{— для } p\text{-волны}.$$

Как отмечено в работах [6, 7], условия безотражательного поглощения оптической волны в рассматриваемой системе выполняются в точках минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны R от толщины слоя l покрытия при значениях l , близких к величинам, кратным $\lambda_d/4$. Поэтому величину \bar{x} можно представить следующим образом:

$$\bar{x} = \frac{2N_0 - 1}{4} + \Delta, \quad (5)$$

где N_0 — номер нулевого минимума зависимости R от l , при котором R достигает своего нулевого значения;

Δ — в общем случае малая величина, но не нулевая.

Подставим соотношение (5) в уравнения (4) и разделим полученные выражения на мнимые и вещественные части. Исключим из них введенный параметр Δ и получим следующие соотношения между углом падения волны, оптическими параметрами и толщиной слоя вещества покрытия, при которых выполняются условия полного поглощения волны соответствующей поляризации:

$$\pi(2N_0 - 1) - \varphi = \frac{1}{\bar{y}} \ln \frac{1}{r}; \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{\varphi}{4\pi}, \quad (7)$$

где $r_1^s = \sqrt{\frac{(1 - \bar{n})^2 + \bar{\chi}^2}{(1 + \bar{n})^2 + \bar{\chi}^2}}$; $\varphi^s = \arctg \frac{2\bar{\chi}}{1 - \bar{n}^2 - \bar{\chi}^2}$ — для s -волны;

$$r_1^p = \sqrt{\frac{(\bar{n} - n^2 + \chi^2)^2 + (\bar{\chi} - 2n\chi)^2}{(\bar{n} + n^2 - \chi^2)^2 + (\bar{\chi} + 2n\chi)^2}}; \quad \varphi^p = \arctg \times$$

$$\times \frac{4\bar{n}n\chi - 2\bar{\chi}(n^2 - \chi^2)}{\bar{n}^2 - (n^2 - \chi^2) - (\bar{\chi}^2 - 4n^2\chi^2)} \quad \text{— для } p\text{-волны.}$$

Найдем величину коэффициента отражения p -волны R_p при условиях полного поглощения s -волны, определяемых уравнениями (6) и (7). Так как при $R_s = 0$

$$r_1^s = \exp(-2ikl \cos \alpha) \quad \text{и} \quad r_2^s = -1,$$

то из уравнения (1) следует, что величина коэффициента отражения p -составляющей волны будет равна

$$\hat{R}_p = \frac{r_1^p + r_1^s}{1 + r_1^p r_1^s}. \quad (8)$$

При выполнении же условия полного поглощения p -волны в рассматриваемой системе ($R_p = 0$)

$$r_1^p = -\exp(-2ikl \cos \alpha) \quad \text{и} \quad r_2^p = 1,$$

и в этом случае из уравнения (1) вытекает аналогичное выражению (8) соотношение для величины коэффициента отражения s -составляющей падающей волны.

Подставим в уравнение (8) выражение (3) для коэффициентов отражения волны r_1^s и r_1^p от границы раздела сред. Получим

$$\hat{R}_s = \hat{R}_p = \frac{(n - i\chi)^2 - (\bar{n} - i\bar{\chi})^2}{(n - i\chi)^2 + (\bar{n} - i\bar{\chi})^2}. \quad (9)$$

На рис. 1 и 2 приведены зависимости между избирательными значениями угла падения волны, оптическими параметрами и величины отклонения Δ толщины слоя вещества покрытия от величины l , кратной $(2N_0 - 1)/4$, которым, согласно уравнениям (6) и (7), соответствуют условия полного поглощения s - и p -волн для $N_0 = 1$.

На рис. 3 представлены вычисленные по уравнению (9) зависимости модуля коэффициента отражения волн от показателя преломления вещества покрытия при различных значениях углов падения волны. Они позволяют оценить величину s - и p -составляющих падающего излучения при условии реализации полного гашения в слое покрытия одной из выбранных его составляющих.

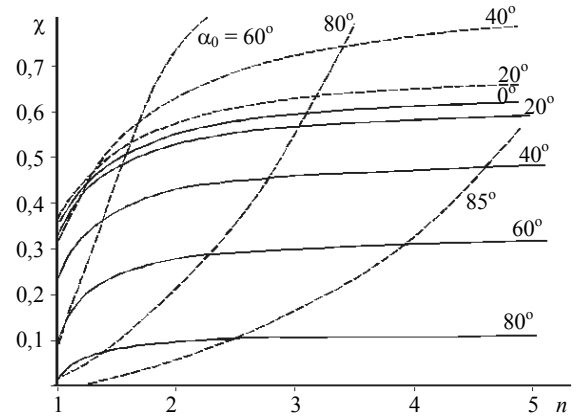


Рис. 1. Зависимости между избирательными значениями коэффициента преломления n и экстинкции χ вещества покрытия при различных углах падения α_0 поперечно-поляризованной (—) и параллельно-поляризованной (---) волн на систему диэлектрик—металл при $N_0 = 1$

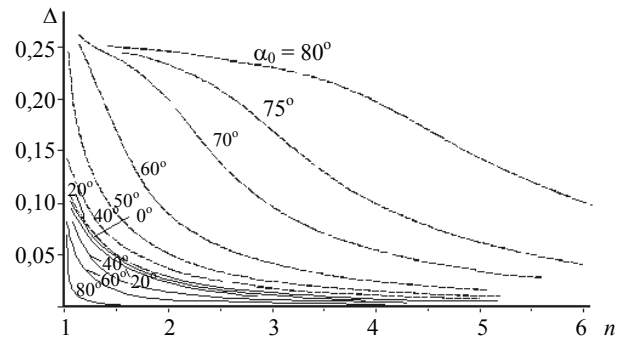


Рис. 2. Зависимости между избирательными значениями коэффициента преломления n и отклонения Δ толщины слоя покрытия от величины, кратной $1/4$ длины волны в веществе при различных углах падения α_0 поперечно-поляризованной (—) и параллельно-поляризованной (---) волн на систему диэлектрик—металл при $N_0 = 1$

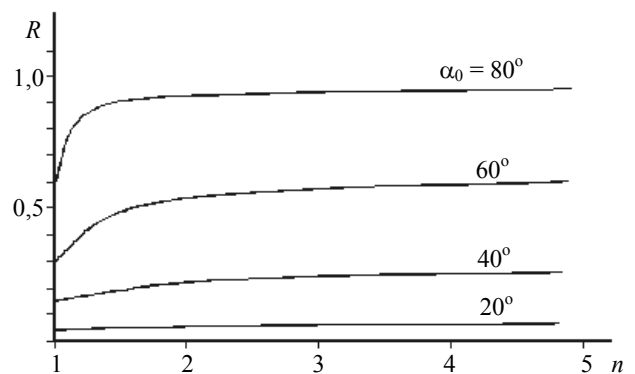


Рис. 3. Зависимости модуля коэффициента отражения волны R поперечно- или параллельно-поляризованной волны при избирательных значениях угла падения волны, толщины слоя, коэффициента преломления и экстинкции вещества покрытия, соответствующих условиям полного поглощения падающего излучения выбранного типа поляризации

Рассмотрение рис. 1—3 позволяет определить значения угла падения волны соответствующей поляризации и толщины слоя выбранного веществ-

ва покрытия, наиболее приемлемые для полного гашения одного типа волны с одновременным выделением второго типа волны. В качестве примера приведен выбор значений угла падения волны и толщины слоя покрытия, когда в качестве материала покрытия использован кварц [8]. При длине волны $\lambda = 10$ мкм коэффициенты преломления волны и экстинкции кварца равны, соответственно, $n = 2,56$ и $\chi = 0,18$. Для $N_0 = 1$ условиям полного поглощения s -составляющей волны соответствуют толщина слоя кварца $l = 1,016$ мкм и угол падения волны $\alpha_0 = 71^\circ$, при этом модуль коэффициента

отражения p -составляющей волны составит 0,68. Условиям же полного поглощения p -составляющей волны в той же двухслойной системе соответствуют толщина слоя покрытия $l = 1,943$ мкм и угол падения волны $\alpha_0 = 83,2^\circ$, при этом модуль коэффициента отражения s -волны составит 0,97 единиц.

Аналогичный расчет проведен и для двухслойных систем, у которых в качестве покрытия использованы вода и смесь оксида Na и диоксида Si в соотношении 1:4. Результаты этих расчетов сведены в таблицу.

Значения модуля коэффициента отражения R : поперечно-поляризованной R_S и параллельно-поляризованной R_P волн ряда веществ покрытия металлической подложки

Вещество покрытия	λ , мкм	n	χ	R	α_0 , град	l , мкм	Δ	R
Вода	3,0	1,391	0,272	$R_S = 0$	52	0,593	0,025	$R_P = 0,34$
				$R_P = 0$	66,5	1,042	0,233	$R_S = 0,58$
Кварцевое стекло (полированное)	10	2,56	0,18	$R_S = 0$	71	1,016	0,010	$R_P = 0,68$
				$R_P = 0$	83,2	1,945	0,248	$R_S = 0,97$
Смесь оксида Na и диоксида Si в соотношении 1:4	10,6	2,40	0,32	$R_S = 0$	56,8	0,614	0,006	$R_P = 0,48$
				$R_P = 0$	80	2,164	0,240	$R_S = 0,93$

П р и м е ч а н и е. При выполнении условия полного поглощения одного из выбранного типа поляризации при толщинах слоя покрытия, близких к $1/4$ длины волны в веществе α_0 , l — избирательные значения угла падения волны и толщины слоя покрытия; n , χ — коэффициент преломления и экстинкции вещества покрытия; λ — длина волны падающего излучения.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности использования эффекта полного поглощения волны при разработке простых поляризаторов для выделения нужной поляризованной составляющей падающих волн.

Л и т е р а т у р а

1. *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. — М.: Изд. АН СССР, 1957. — 502 с.
 2. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — М.: Наука, 1970. — 856 с.

3. *Ярив А. Юх П.* Оптические волны в кристаллах. — М.: Мир, 1987. — 488 с.
 4. *Касимов Р. М.* // Инженерно-физический журнал. 1994. Т. 67. № 5—6. С. 489—492.
 5. *Касимов Э. Р.* // Там же. 2003. Т. 76. № 1. С. 105—109.
 6. *Касимов Р. М., Karamaliev R. A., Salmanov V. M.* // Trans. NAS Azerb. 2006. V. 26. No. 5. С. 118—124.
 7. *Karamaliyev R. A., Kasimov R. M.* // Fizika. 2006. V. 12. No. 3. P. 26—30.
 8. *Золотарев В. М., Морозов В. М., Смирнова Е. В.* Оптические постоянные природных и технических сред. — Л.: Химия, 1984. — 216 с.

Статья поступила в редакцию 12 июня 2008 г.

Selection of the given polarizing component of optical radiation at its reflection from two-layer system dielectric-metal

R. M. Kasimov, R. A. Karamaliev
 Institute of Chemical Problems of National Academy of Sciences,
 Baku State University, Baku, Azerbaijan
 E-mail: itpcht@an.ab.az.

Conditions selecting either polarizing components of the optical radiation falling under an angle on two-layer system, dielectric—metal are found.

PACS: 41.20.-q

* * *