BAKI UNİVERSİTETİNİN XƏBƏRLƏRİ

№3 Fizika-riyaziyyat elmləri seriyası 2009

АНТИОТРАЖЕНИЕ TE- и TM- ВОЛН В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ

М.М.ПАНАХОВ, Р.А. КАРАМАЛИЕВ

Бакинский Государственный Университет

karamaliyev@ yahoo.com

Рассмотрено не отражающее электромагнитное излучение двухслойной системы диэлектриков. Получены зависимости коэффициента отражения от толщины пленки, оптических постоянных сред и угла падения излучения. Найдены условия безотражательного прохождения для монохроматической волны с заданной (TE) s- и (TM) p- поляризацией.

1. Введение

В настоящее время широкое развитие в оптике нашли работы связанные с созданием слоистых систем обеспечивающих безотражательное прохождение через них электромагнитного излучения [1-3]. На практике применяются слоистые системы, формируемых как из прозрачных,так и из поглощающих материалов для заданного диапазона длин волн. Использование дополнительных не поглощающих, так называемых, просветляющих покрытий для тепловых приемников и преобразователей микроволнового, инфракрасного и оптического излучения позволило бы обеспечить повышение коэффициента полезного действия преобразования.

В этой связи становится актуальной теоретический анализ данного явления, который обеспечил бы выбор необходимых материалов просветляющихся покрытий [4,5].

Целью данной работы является изучение особенностей отражения и прохождения электромагнитного излучения в двухслойной системе диэлектриков при его наклонном падении.

2. Основные соотношения

Рассмотрим отражение электромагнитной волны падающей под углом α_0 на плоский слой диэлектрика, нанесенного на диэлектрическую подложку. При этом с учетом положения вектора электрической поляризации волны по отношению к плоскости ее падения будем различать случаи отражения параллельно- поляризованной (TM- волна или p- поляризация) и поперечно-поляризованной (TE- волна или s- поляризация) волны, соответственно когда вектор **E** параллелен или перпендикулярен плоскости падения волны.

Известно, что в случае нормального падения монохроматического света на систему двух диэлектриков условие просветления имеет вид [6]:

$$n_1 = (n_0 n_2)^{1/2} \ , \qquad (1)$$

где n_0, n_1 и n_2 - показатели преломления первой среды, слоя покрытия и подложки, соответственно.

Если подложка такой системы является поглощающей, тогда условие (1) для нормального падения света принимает вид [6]:

$$n_1 = (n_0 n_2 + \frac{n_0^2 \chi_2^2}{n_0 n_2 - n_0^2})^{1/2} . \qquad (2)$$

Здесь χ_2 - коэффициент экстинкции подложки. При $\chi_2 = 0$ из условия (2) вытекает выражение (1).

Комплексная амплитуда отражения монохроматической световой волны при его наклонном падении на двухслойную систему под углом α_0 представляется в виде [6]:

$$R = \frac{r_1 + r_2 e^{-2ikl\cos\alpha}}{1 + r_1 r_2 e^{-2ikl\cos\alpha}} \quad , \qquad (3)$$

где $k = 2\pi n_1 / \lambda$ - волновое число, $\lambda -$ длина волны падающего излучения, α - угол преломления света в диэлектрическом слое, $l -$ толщина слоя. Входящие в уравнение (3) коэффициенты отражения волны r_1 и r_2 от границ раздела сред системы в зависимости от типа поляризации падающей волны выражаются формулами Френеля [6]:

$$r_1^s = \frac{\cos\alpha_0 - n_1 \cos\alpha}{\cos\alpha_0 + n_1 \cos\alpha_1} \quad , \qquad (4а)$$

$$r_2^s = \frac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cos\alpha_1}{n_1 \cos\alpha + n_2 \cos\alpha_1} , \qquad (4б)$$

$$r_1^p = \frac{n_1 \cos\alpha_0 - \cos\alpha}{n_1 \cos\alpha_0 - \cos\alpha} , \qquad (5а)$$

$$r_2^p = \frac{n_2 \cos\alpha - n_1 \cos\alpha_1}{n_2 \cos\alpha - n_1 \cos\alpha_1} . \qquad (5б)$$

В формулах Френеля (4) и (5) положено $n_0 = 1$. Введем обозначения:

$$\cos\alpha_0 = (1 - \sin^2\alpha_0)^{1/2}, \quad \cos\alpha = (1 - \frac{\sin^2\alpha_0}{n_1^2})^{1/2}, \quad \cos\alpha_1 = (1 - \frac{\sin^2\alpha_0}{n_2^2})^{1/2} . \qquad (6)$$

Здесь r_1^s, r_2^s, r_1^p, r_2^p - коэффициенты отражения от границ раздела воздух-слой и слой- подложка для s - и p-поляризованной волны, соответственно.

3. Безотражательное прохождение s - поляризованной волны

При падении s- поляризованной световой волны под углом α_0 на поверхность двухслойной системы диэлектриков френелевские коэффициенты отражения r_1^s и r_2^s можно представить в виде:

$$r_1^s = \frac{\cos\alpha_0 - \bar{n}_1}{\cos\alpha_0 + \bar{n}_1}, \tag{7а}$$

$$r_2^s = \frac{\bar{n}_1 - \bar{n}_2}{\bar{n}_1 + \bar{n}_2}, \tag{7б}$$

где
$$\bar{n}_i = (n_i^2 - \sin^2\alpha_0)^{1/2}, \quad i = 1,2. \tag{8}$$

Из выражения (3) видно, что для возникновения явления безотражательного прохождения в рассматриваемой двухслойной системе необходимо равенство модулей коэффициентов отражения r_1^s и r_2^s. Приравнивая выражения (7а) и (7б) находим формулу для определения значения показателя преломления покрытия в зависимости от угла падения света на поверхность покрытия и показателя преломления подложки, при которых происходит безотражательное прохождение:

$$n_1 = (\sin^2\alpha_0 + \bar{n}_2\cos\alpha_0)^{1/2}. \tag{9}$$

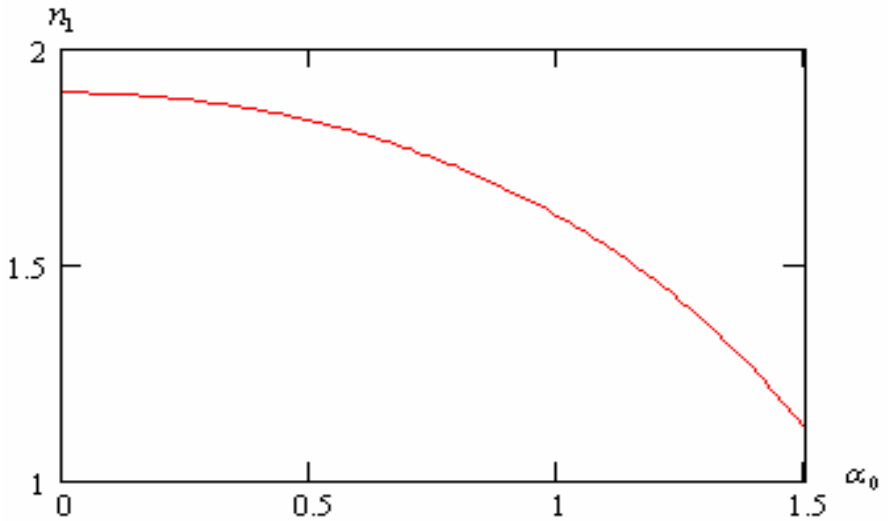

Рис.1. Зависимость показателя преломления оптического покрытия на диэлектрической подложке от угла падения для s- поляризованного излучения $n_2 = 3.6$.

На рис.1 представлена зависимость показателя преломления покрытия n_1 от угла падения света α_0. по формуле (9). Из рисунка видно, что при увеличении угла падения света значение показателя преломления покрытия уменьшается. Следует отметить, что при больших значениях угла падения из-за маленькой

величины показателя преломления слоя антиотражение s- поляризованной волны невозможно.

Толщина просветляющегося слоя l в этом случае поляризации также зависит от угла падения света и определяется формулой:

$$l = \frac{\lambda(2N-1)}{4(n_1^2 - \sin^2\alpha_0)^{1/2}} = \frac{\lambda(2N-1)}{4((n_2^2 - \sin^2\alpha_0)^{1/2}\cos\alpha_0)^{1/2}}, \qquad (10)$$

где N=1,2,3…- натуральное число.

.

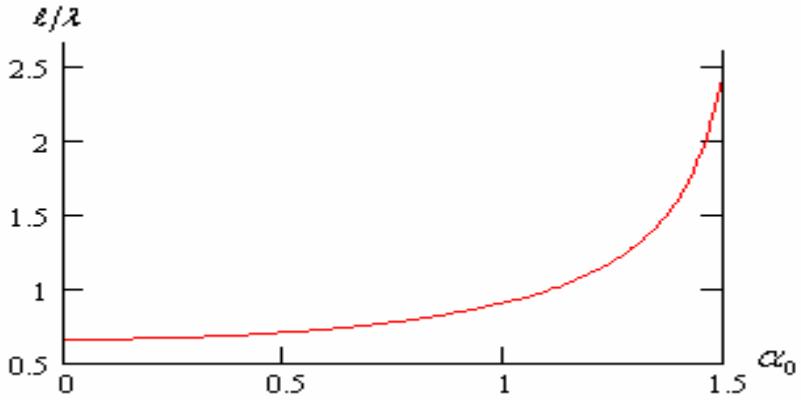

Рис.2. Зависимость относительной толщины диэлектрического слоя l/λ от угла падения для s- поляризованного света при N=3.

На рис.2 представлена зависимость толщины диэлектрического слоя от угла падения света для s- поляризации. Как видно из рисунка, с увеличением угла падения света толщина слоя покрытия растет. Нетрудно заметить, что в случае нормального падения света минимальная толщина слоя равна четверти длины волны в веществе.

Теперь рассмотрим угловую зависимость коэффициента отражения s-поляризованной волны. Из формулы (3) для энергетического коэффициента отражения s- поляризации имеем:

$$R^s = \frac{(r_1^s)^2 + (r_2^s)^2 + 2r_1^s r_2^s \cos(4\pi n_1 l\cos\alpha/\lambda)}{1 + (r_1^s)^2 (r_2^s)^2 + 2r_1^s r_2^s \cos(4\pi n_1 l\cos\alpha/\lambda)} \qquad (11)$$

Входящие в (11) $\cos\alpha$, r_1^s и r_2^s для s- поляризации заданы в формулах (6), (7а), (7б) и (8). В общем случае энергетический коэффициент отражения для заданной поляризации зависит от показателей преломления покрытия и подложки n_1, n_2, длины волны падающего света λ. Среди этих зависимостей наибольший интерес представляет явление просветления оптического покрытия, т.е. случай антиотражения света, который реализуется для s- поляризованной волны при выполнении условий (9) и (10). Отметим, что угловая зависимость

коэффициента отражения для подложки при отсутствии покрытия выражается формулами Френеля и общеизвестно.

На рис.3 показана зависимость энергетического коэффициента отражения s-поляризованной волны от угла падения. Видно, что отражение

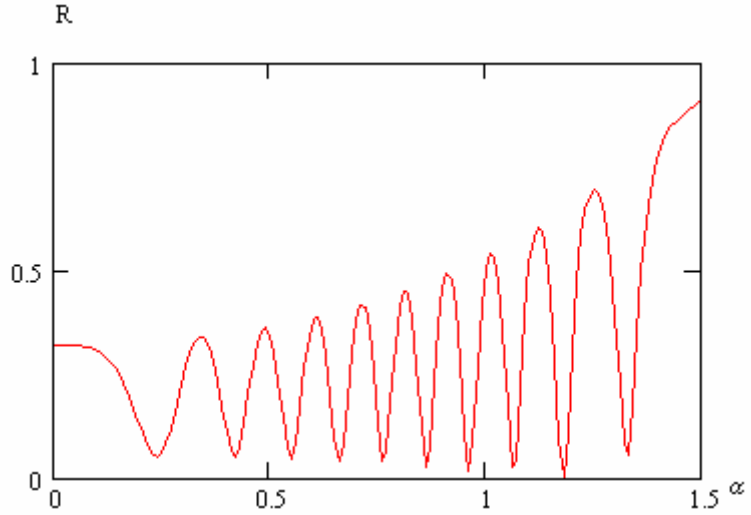

Рис.3. Зависимость энергетического коэффициента отражения s- поляризованной волны.от угла падения . $n_1 = 1.5$; $n_2 = 3.6$; $(nl/\lambda) = 20$.

4. Безотражательное прохождение p- поляризованной волны

Если на поверхность рассматриваемой двухслойной системы падает p-поляризованная волна, то коэффициенты отражения от границ системы можно представить в виде:

$$r_1^p = \frac{n_1^2 \cos\alpha_0 - \overline{n}_1}{n_1^2 \cos\alpha_0 + \overline{n}_1} \qquad (12а)$$

$$r_2^p = \frac{n_2^2 \overline{n}_1 - n_1^2 \overline{n}_2}{n_2^2 \overline{n}_1 + n_1^2 \overline{n}_2} \qquad (12б)$$

Из условия равенства модулей $r_1^p = r_2^p$ можно получить выражение для просветления покрытия в случае p- поляризованной волны:

$$\frac{n_1^4}{n_1^2 - \sin^2\alpha_0} = \frac{n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2\alpha_0}\,\cos\alpha_0} \qquad (13)$$

Решение уравнения (13) позволяет найти зависимость показателя преломления покрытия n_1 от показателя преломления подложки n_2 и угла падения излучения α_0. Биквадратное уравнение для определения зависимости n_1 от угла падения света α_0 имеет вид:

$$n_1^4 - \frac{n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2\alpha_0}\cos\alpha_0} n_1^2 + \frac{n_2^2 \sin^2\alpha_0}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2\alpha_0}\cos\alpha_0} = 0 \qquad (14)$$

Из биквадратного уравнения (14) для случая нормального падения света $\alpha_0 = 0$ вытекает известное условие (1) справедливое для обеих поляризаций. Следует отметить, что решение уравнения (14) допускает два случая зависимости показателя преломления покрытия от угла падения излучения для p- поляризации. Эти решения соответствуют двум положительным корням уравнениям (14):

$$n_1^{\pm} = \sqrt{\frac{0.5 n_2^2}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2\alpha_0}\cos\alpha_0} \pm \sqrt{\frac{0.25 n_2^4}{\left(n_2^2 - \sin^2\alpha_0\right)\cos^2\alpha_0} - \frac{n_2^2 \sin^2\alpha_0}{\sqrt{n_2^2 - \sin^2\alpha_0}\cos\alpha_0}}} \qquad (15)$$

Сравнивая выражения (9) и (15) нетрудно заметить различие в характерах зависимостей n_1 для s- поляризации и $n_1^{\pm}$ для p- поляризации от угла падения света. В отличие от s- поляризации в случае p- поляризации величины n_1^+ и n_1^- в зависимости от угла падения увеличиваются. На рис.4 показаны зависимости n_1^+ от угла падения излучения для p- поляризации.

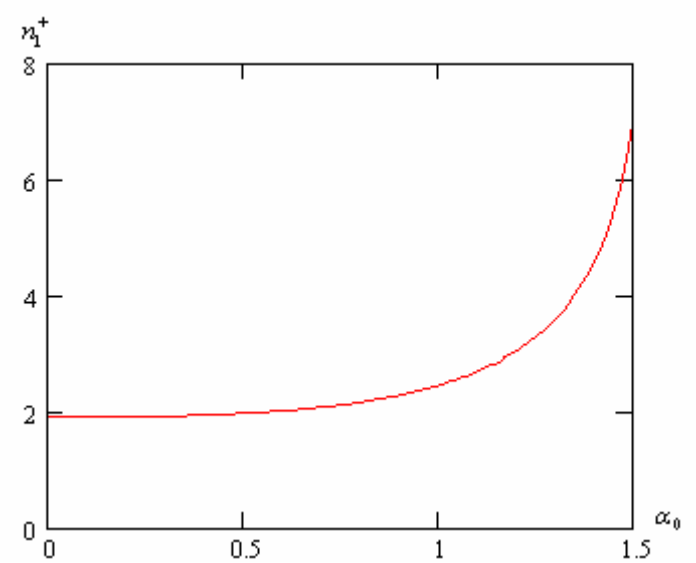

Рис. 4. Угловая зависимость показателя преломления диэлектрического покрытия n_1^+ для p- поляризации $n_2 = 3.6$.

При этом толщина просветляющего слоя в зависимости от рассматриваемого корня уравнения (15) будет определена следующим образом:

$$l^{\pm} = \frac{(2N-1)\lambda}{4\sqrt{\left(n_1^{\pm}\right)^2 - \sin^2\alpha_0}} \qquad (16)$$

Чтобы вычислить энергетический коэффициент отражения p-поляризованной волны R^p необходимо в формуле (15) коэффициенты отражения заменить выражениями (12а) и (12б), соответственно.

5. Заключение

Рассмотрено прохождение поляризованного оптического излучения в двухслойной диэлектрической системе при наклонном падении на ее поверхность. Найдены условия просветления для этой системы при нанесении покрытия на поверхность подложки. Показано, что при s- поляризации падающего излучения для реализации эффекта просветления с заданным покрытием существует определенное значение угла падения. В случае p-поляризованного излучения существует два угла просветления. Определены значения толщины для возникновения просветления в случаях s- и p-поляризованной волны. Вычислены значения коэффициентов отражения для поляризованного излучения в зависимости от угла падения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arst H.Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies. Springer: 2003, p.306.
2. Yeh P. Optical Waves in Layered Media, Wiley, 1988, p.406.
3. Verdeyen J.T. Laser Electronics. New Jersey, 1995, p,780.
4. Касимов Р.М., Карамалиев Р.А.,Салманов В.М. Безотражательное поглощение электромагнитного излучения в оптических средах. Xəbərlər, Azər.Elm.Akad., fiz.-riy. və tex. elm. ser., 2006, №5, s.118-123.
5. Касимов Р.М., Карамалиев Р.М. Способ выделения поляризационных составляющих электромагнитного излучения // Труды Международной конференции «Научно-техн. прогресс и современная авиация» посвященной 75-летию академика А.М. Пашаева. Баку: 2009, с.108-110.
6. Born M., Wolf E. Principles of Optics, Academic Press, New York: 1975, p.856.

TE- və TM- DALĞALARIN
İKİLAYLI DİELEKTRİK SİSTEMİNDƏN ƏKS OLUNMAMASI

M.M.PƏNAHOV, R.Ə.KƏRƏMƏLİYEV

XÜLASƏ

Elektromagnit şüalanmasını əks etdirməyən ikilaylı dielektrik sisteminə baxılmışdır. Əks olunma əmsalının layın qalınlığından, mühitlərin optik sabitlərindən və şüalanmanın düşmə bucağından asılılıqları alınmışdır. (TE) s- və (TM) p-polyarlanmış monoxromatik dalğaların əks olunmadan keçməsi şərtləri tapılmışdır.

ANTIREFLECTION OF TE- AND TM-
WAVES IN TWO-LAYER DIELECTRIC SYSTEM

M.M.PANAHOV, R.A.KARAMALIYEV

SUMMARY

The article studies the dielectric two-layer system not reflecting electromagnetic radiation. Dependences of reflection coefficient on thickness of the film, optical constants of media and the incident angle of radiation are received. Conditions for antireflective passages of a monochromatic wave with (TE) s-and (TM) p-polarization are found.