

## Illuminance distribution formed by light beam reflected from a retroreflector

R. E. Ilinsky

Special Research Bureau OKB MEI, Moscow, Russia

*This paper discusses a calculation in the approximation of geometrical optics of the irradiance distribution that forms the light beam after reflection from a retroreflector. The transmissive optical system consists of a collimating objective and a radiation source.*

УДК 538.56:625.365

## Условия безотражательного гашения электромагнитного излучения в слое поглощающего диэлектрика

Р. М. Касимов, Э. Р. Касимов

Институт химических проблем и Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

*Найдены условия безотражательного гашения электромагнитной волны при ее прохождении через плоский поглощающий слой диэлектрика, расположенного на границе раздела двух непоглощающих сред. Исследуется их зависимость от толщины поглощающего слоя, оптических свойств прилегающих сред и вещества поглощающего слоя. Рассмотрены энергетические соотношения между поглощенным в слое диэлектриком и прошедшим через него электромагнитного излучения в условиях отсутствия отражения волны.*

Минимизация отражения электромагнитного излучения в направляющих оптических слоистых и прозрачных системах является хорошо известной и решаемой задачей [1, 2]. Однако ее решение значительно усложняется, если сама оптическая система или ее отдельные слои содержат поглощающие материалы.

Для исследования явления безотражательного гашения волн в поглощающих слоистых средах рассмотрим в качестве его начального этапа частную задачу отражения плоскополяризованной волны, падающей нормально на регулируемый по толщине слой поглощающего диэлектрика, который разделяет две полубесконечные прозрачные среды с коэффициентами преломления волны  $n_1$  и  $n_2$ . При падении волны из среды с  $n_1$  комплексные значения коэффициентов отражения  $\hat{R}$  и преломления  $\hat{T}$  волны для рассматриваемой слоистой системы определяются выражениями:

$$\hat{R} = \frac{\hat{r}_1 + \hat{r}_2 \exp(-2ikl)}{1 + \hat{r}_1 \hat{r}_2 \exp(-2ikl)}; \quad \hat{T} = \frac{\hat{t}_1 \hat{t}_2 \exp(-ikl)}{1 + \hat{r}_1 \hat{r}_2 \exp(-2ikl)}, \quad (1)$$

где  $\hat{r}_1 = (n_1 - \hat{n}) / (n_1 + \hat{n})$ ;  $\hat{r}_2 = (\hat{n} - n_2) / (\hat{n} + n_2)$ ;

$\hat{t}_1 = 2n_1 / (n_1 + \hat{n})$ ;  $\hat{t}_2 = 2\hat{n} / (\hat{n} + n_2)$  — соответственно, комплексные значения коэффициентов отражения и преломления на границах раздела смежных сред;

$l$  и  $\hat{n}$  — толщина и комплексное значение коэффициента преломления поглощающего слоя [1].

Входящее в уравнения (1) волновое число для вещества поглощающего слоя равно

$$k = \frac{2\pi\hat{n}}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_g}(1 - iy), \quad (2)$$

где  $\hat{n} = n - iy$ ;  $y = \chi/n$  — фактор диэлектрических потерь;

$n = \lambda/\lambda_d$ ,  $\chi$  — соответственно, коэффициенты преломления и поглощения вещества поглощающего слоя;

$\lambda$ ,  $\lambda_d$  — длина волны, соответственно, в вакууме и в поглощающем слое.

В рассматриваемой задаче

$$\hat{r}_1 = r_1 \exp(i\varphi_1); \quad \hat{r}_2 = r_2 \exp(i\varphi_2), \quad (3)$$

$$\text{где } r_1 = \sqrt{\frac{(n_1 - n)^2 + \chi^2}{(n_1 - n)^2 + \chi^2}}, \quad r_2 = \sqrt{\frac{(n - n_2)^2 + \chi^2}{(n - n_2)^2 + \chi^2}},$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{2\chi n_1}{n_1^2 - n^2 - \chi^2}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{2\chi n_2}{n_2^2 - n^2 - \chi^2}$$

соответственно, модули и фазы коэффициентов отражения волны от границ раздела смежных сред.

При отсутствии поглощения в разделяющем слое ( $\chi = 0$ ) безотражательное прохождение волны через этот слой может иметь место при избирательных значениях толщины слоя и его коэффициента преломления, соответствующих известным условиям просветления слоистых оптических сред

$$n_e = \sqrt{n_1 n_2}; \quad l_b = \lambda_d \frac{2N - 1}{4}, \quad (4)$$

где  $N$  — целое число [1].

При наличии поглощения в разделяющем слое диэлектрика зависимость модуля коэффициента отражения  $R$  электромагнитного излучения от толщины  $l$  его слоя носит осциллирующий и затухающий характер. Безотражательное прохождение излучения через поглощающий слой диэлектрика возможно в одной из точек минимума этой зависимости и при достижении величины этого минимума нулевого значения.

Таким образом, в этом  $N$ -ном по счету и названном нулевым минимуме функции  $R(l)$  должны выполняться условия равенства нулю величины модуля  $R$  и его производной.

Обозначим через  $x = l/\lambda_d$  и предположим, что минимумы, в том числе и возможный нулевой минимум функции  $R(l)$ , реализуются при толщинах  $l_0$  слоя поглощающего диэлектрика, по величине близкими к значениям, кратным  $\lambda_d/4$ , т. е.

$$x = \frac{l_0}{\lambda_d} = \frac{(2N - 1)}{4} + \Delta, \quad (5)$$

где  $N$  — номер нулевого минимума  $R$ ;

$\Delta$  — некоторая малая, но ненулевая величина, определяемая номером нулевого минимума и оптическими свойствами вещества поглощающего слоя [3].

Очевидно, что безотражательному прохождению волны через поглощающий слой в рассматриваемой системе должно соответствовать условие  $\hat{R} = 0$ , которое в соответствии с первым уравнением (1) и с учетом соотношений (2)—(5) приводит к следующим двум уравнениям:

$$\exp(-4\pi x) = \frac{r_1}{r_2}; \quad 4\pi\Delta = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (6)$$

Подставим в первое из них соотношение (5) для  $x$ , и решим совместно оба уравнения (6), исключив из них  $\Delta$  в качестве промежуточного параметра. Получим обобщенное уравнение

$$\pi(2N - 1) + (\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{n}{\chi} (\ln r_2 - \ln r_1). \quad (7)$$

Входящие в уравнение (7) параметры  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  зависят от оптических свойств веществ рассматриваемой системы. Поэтому это уравнение определяет функциональные связи между такими избирательными величинами  $n$ ,  $\chi$  поглощающего слоя вещества и  $n_1$ ,  $n_2$  прилегающих к нему сред, при которых в системе создаются условия для безотражательного прохождения электромагнитного излучения через поглощающий слой диэлектрика. Необходимая для этого толщина слоя поглощающего диэлектрика определится в соответствии с соотношениями (5) и (6) выражением

$$l_0 = \frac{\lambda}{4n} \left[ (2N - 1) + \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{\pi} \right]. \quad (8)$$

В частном случае при отсутствии поглощения в разделяющем слое поглощающего диэлектрика  $\chi = 0$ ,  $\Delta = 0$ , и уравнения (7) и (8) переходят в уравнения (4).

С учетом соотношения величин  $n_1$ ,  $n_2$  прилегающих сред рассмотрим два варианта решения полученных уравнений (7), (8): когда электромагнитное излучение проходит через слой диэлектрика из оптически менее плотной среды в более плотную среду (прямая задача,  $n_1 < n_2$ ) и когда волна проходит через слой диэлектрика из более плотной оптической среды в менее плотную непоглощающую среду (обратная задача,  $n_1 > n_2$ ). При этом для удобства представления получаемых результатов решения уравнений (7) и (8) будем пользоваться приведенными значениями  $n$ ,  $n_1$  и  $n_2$ , отнесенными в зависимости от рассматриваемого варианта задачи к коэффициенту преломления оптически наименее плотной из прилегающих к слою непоглощающих сред.

Результаты решения уравнений (7) и (8) для обоих из указанных вариантов задачи приведены на рис. 1 и 2, где представлены семейства зависимостей между избирательными значениями коэффициентов преломления прилегающих сред  $n_1$ ,  $n_2$ , коэффициентами преломления  $n$  и поглощения  $\chi$  вещества разделяющего слоя, а также величинами отклонения  $\Delta$  избирательной толщины  $l_0$  слоя диэлектрика от величин, кратных  $\lambda_d/4$ .

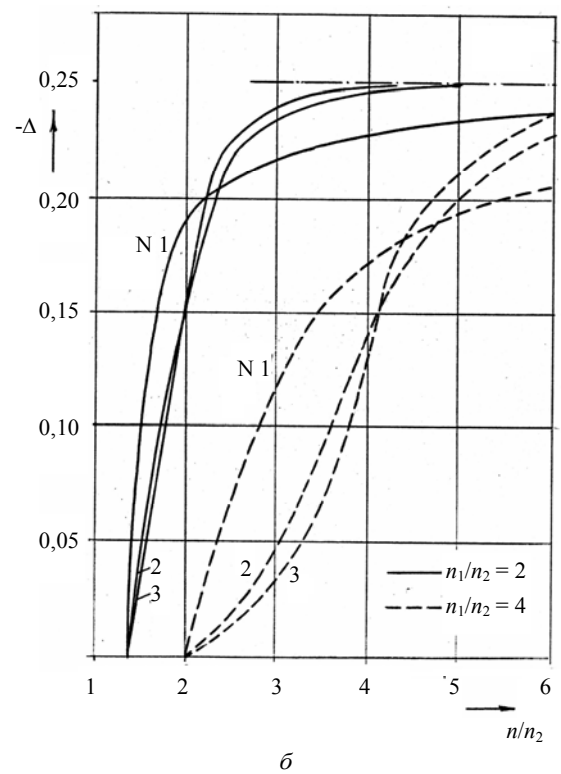
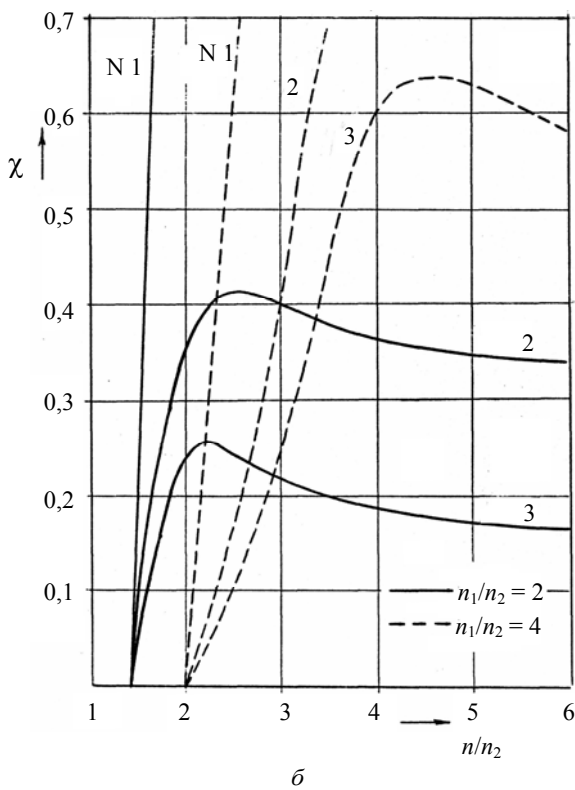
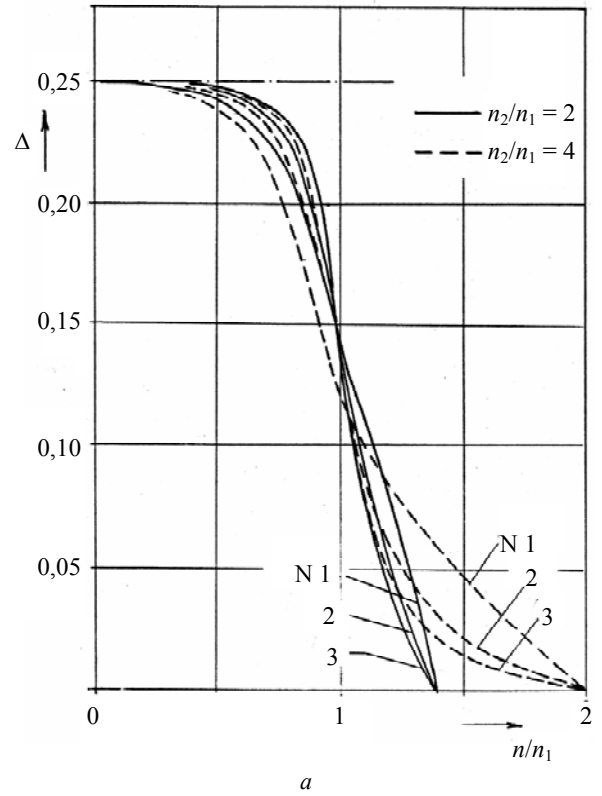
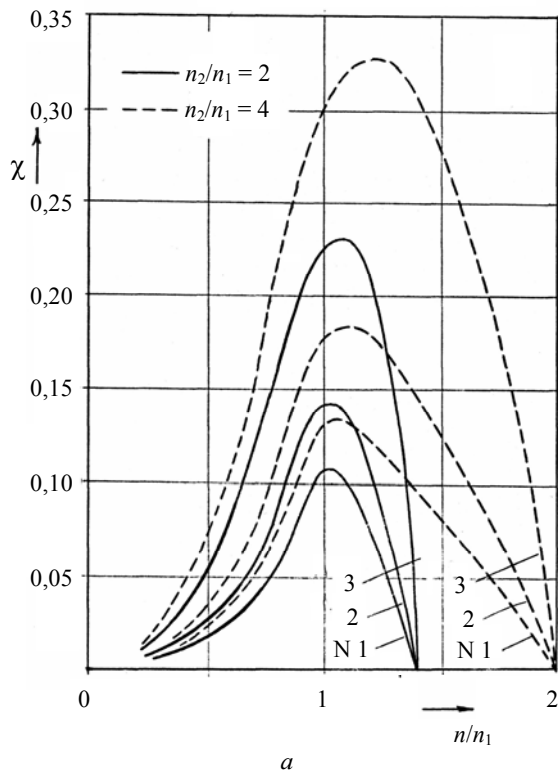


Рис. 1. Зависимости между избирательными значениями коэффициента поглощения  $\chi$  поглощающего слоя диэлектрика, коэффициентов преломления  $n$  этого слоя и  $n_1, n_2$  разделяемых им двух непоглощающих сред при прохождении волны из оптически менее плотной среды в среду более плотную (а) и из оптически плотной среды в среду менее плотную (б).

$N$  — номер нулевого минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны от толщины разделяющего слоя диэлектрика

Рис. 2. Зависимости между величиной отклонения  $\Delta$  толщины поглощающего слоя от величин, кратных четверти длины волны в диэлектрике, и избирательными значениями коэффициентов преломления  $n, n_1, n_2$ , соответственно, вещества слоя и разделяемых им двух непоглощающих сред при прохождении волны из оптически менее плотной среды в среду более плотную (а) и из оптически плотной среды в среду менее плотную (б).

$N$  — номер нулевого минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны от толщины разделяющего слоя диэлектрика

Как следует из рис. 1 и 2, безотражательное прохождение волны через поглощающий слой диэлектрика из оптически менее плотной среды в оптически более плотную среду ( $n_1 < n_2$ ) становится возможным, если его коэффициент преломления  $n$  меньше граничного значения  $n_b$ , определяемого из условия просветления для непоглощающего слоя  $n_b = \sqrt{n_1 n_2}$ . Противоположная картина будет иметь место при решении обратной задачи — прохождении волны из оптически более плотной среды в среду оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ). В этом случае, для выполнения условия безотражательного прохождения волны через поглощающий слой диэлектрика необходимо, чтобы его  $n$  был больше  $n_b$ . При этом выбираемая для выполнения условий безотражательного прохождения волны толщина слоя будет по величине всегда больше или меньше значений кратных  $\lambda_d / 4$ , соответственно, для прямой или обратной задач. Эти отклонения возрастают и становятся существенными с увеличением разности между  $n$  вещества поглощающего слоя и граничного значения  $n_b$ .

С ростом номера  $N$  нулевого минимума функции  $R(I)$ , а следовательно, с увеличением избирательной толщины поглощающего слоя зависимости  $\chi$  от  $n$  (см. рис. 1, 2) приближаются к оси абсцисс. Последнее указывает на возможность безотражательного прохождения волны через слой вещества, обладающего слабым затуханием излучения.

Если заданы коэффициенты преломления прилегающих к слою сред и известно поведение оптических свойств вещества поглощающего слоя с частотой, то уравнения (7) и (8), как это следует из приведенных рис. 1 и 2, могут быть использованы для расчета избирательной длины волны падающего излучения и толщины поглощающего слоя, при которых будет иметь место безотражательное прохождение волны через поглощающий слой. Уравнения могут быть также востребованы в тех случаях, когда при заданной длине волны излучения необходимо оценить параметры и толщину поглощающего слоя диэлектрика.

Из совместного решения уравнений (1) с учетом выполнения условия  $\hat{R} = 0$  для безотражательного прохождения электромагнитного излучения в рассматриваемой системе получим выражение, определяющее ту часть энергии падающего излучения, которая прошла через слой поглощающего диэлектрика

$$\tau = \frac{n_2}{n_1} |\hat{T}|^2 = \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{[n_1^2 - n^2 - \chi^2]^2 + 4n_1^2 \chi^2}{[n^2 + \chi^2 - n_2^2]^2 + 4n_2^2 \chi^2}} \quad (9)$$

Входящие в уравнение (9) избирательные величины  $n_1, n_2, n, \chi$  соответствуют условиям безотражательного прохождения волны через поглощающий

слой диэлектрика и функционально связаны между собой уравнением (7). На рис. 3 представлены полученные по уравнениям (7) и (9) зависимости между величиной, прошедшей через поглощающий слой диэлектрика относительной энергии волны  $\tau$  и избирательными значениями коэффициентов преломления, входящих в систему веществ. Результаты решения даны, соответственно, для случаев прямой и обратной задач прохождения волны через поглощающий слой между средами с различной оптической плотностью.

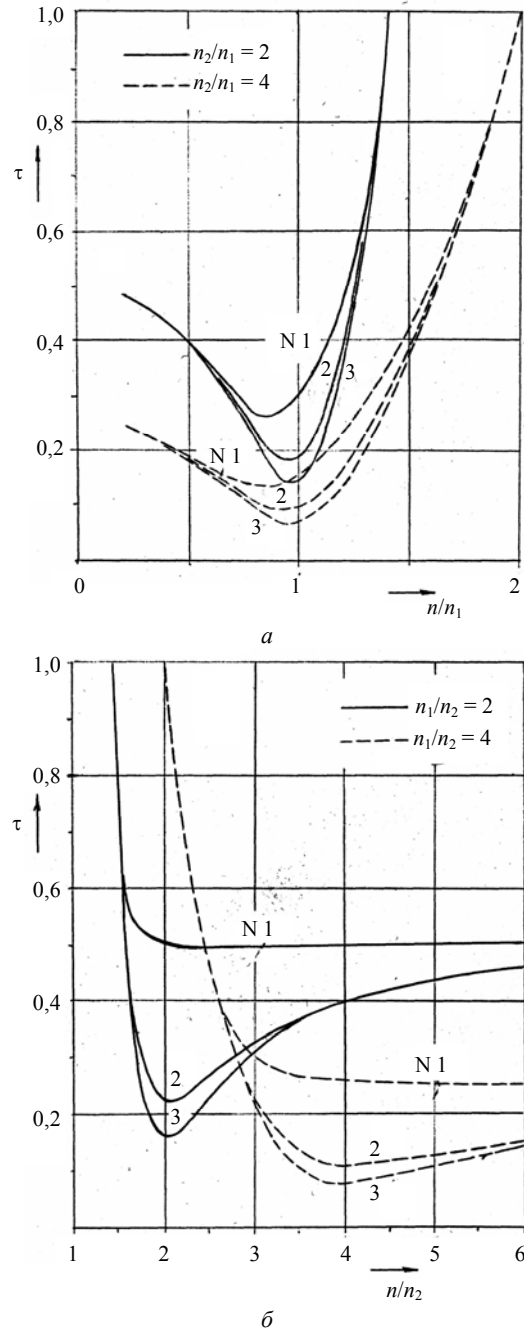


Рис. 3. Зависимости между относительной величиной энергии  $\tau$  электромагнитного излучения, прошедшей через поглощающий слой диэлектрика, и избирательными значениями коэффициентов преломления веществ слоя диэлектрика  $n$  и разделяемых им сред  $n_1$  и  $n_2$  при прохождении волны из оптически менее плотной среды в более плотную (а) и из оптически плотной среды в менее плотную (б).

$N$  — номер нулевого минимума зависимости модуля коэффициента отражения волны от толщины разделяющего слоя диэлектрика

Полученные зависимости  $\tau$  от  $n$  имеют минимумы, которые располагаются вблизи  $n = n_1$  для прямой задачи и  $n = n_2$  — для обратной задачи прохождения волны через слой. Величины этих минимумов  $\tau$  уменьшаются с увеличением степени различия между коэффициентами преломления  $n_1$ ,  $n_2$  у пограничных  $k$  слоя непоглощающих сред и номера  $N$  выбираемого нулевого минимума функции  $R(l)$ . В последнем случае при  $N \rightarrow \infty$  величина минимума зависимости  $\tau$  от  $n$  достигает нулевого значения, соответственно, при  $n = n_1$  или  $n = n_2$  с учетом рассмотрения прямой или обратной задачи прохождения волны через слой диэлектрика.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке композиционных материалов для оптических поглощающих покрытий, наносимых на непоглощающие диэлектрические подложки.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. — М.: Изд. АН СССР, 1957.
2. Ван де Виле Ф. // Сб.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. — М.: Мир, 1979. С. 28.
3. Касимов Р. М., Каджар Ч. О. // Доклады АН Азербайджана, 1998. Т. 54. № 5—6. С. 67—70.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2006 г.

## Conditions of reflectionless extinguish of electromagnetic radiation in the layer of absorbing dielectric

R. M. Kasimov, E. R. Kasimov

Institute of Chemistry Problems and Institute Physics of Azerbaijan Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

*Conditions of reflectionless extinguish of electromagnetic wave while its going through a flat absorbing layer of dielectric located on the border of two non-absorbing media have been found. Dependence of these conditions on thickness of absorbing layer, optical properties of applying media and substance of absorbing layer have been investigated. Energy balance between the absorbed in the layer of dielectric and moved through it electromagnetic radiation in conditions of reflection wave absence has been examined.*

УДК 548.232.4

## Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве

О. Н. Шабловский

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Белоруссия

*Проблема роста дендрита в переохлажденном расплаве изучается с позиций теории локально-неравновесного теплопереноса. Представлены динамические условия совместности на трехмерной фазовой границе кристаллизации однокомпонентной системы. Градиентная катастрофа теплового поля является предвестником зарождения боковой ветви дендрита. Указаны три типа градиентных катастроф на двумерной линии роста (плоской либо осесимметричной). Дана теплофизическая интерпретация результатов экспериментов по дендритной кристаллизации.*

Современное состояние исследований роста иглообразного дендрита в переохлажденном распла-

ве и роста кристалла из пересыщенного раствора представлено в работах [1—5]. Анализ тепло- и мас