

УДК 621.3.035.222.7:621.317.335.3

## Просветление тепловых приемников электромагнитного излучения

Ч. О. Каджар, Р. М. Касимов, С. Р. Касимова  
Институт фотоэлектроники АН Азербайджана,  
Баку, Азербайджан

*Исследована зависимость условий и полосы просветления приемников электромагнитного излучения от толщины слоя и диэлектрических свойств светляющего покрытия, а также от диэлектрических свойств и природы дисперсии волн поглощающего вещества.*

Чувствительность тепловых приемников микроволнового и инфракрасного диапазонов волн может быть существенно улучшена за счет более полного поглощения в них поступающей энергии. Последнее достижимо нанесением на них просветляющего слоя из непоглощающего вещества, согласующего входное сопротивление приемника с волновым сопротивлением свободного пространства. Для решения этой задачи рассмотрим отражение плоскополяризованной электромагнитной волны, нормально падающей на двухслойную систему из полубесконечного слоя поглощающего материала подложки с комплексным значением диэлектрической проницаемости  $\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon''$  и нанесенного на нее регулируемого по толщине слоя покрытия из непоглощающего вещества с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ . Модуль коэффициента отражения волны такой системы равен

$$\rho = \frac{|Z_B - Z_0|}{|Z_B + Z_0|}, \quad (1)$$

где  $Z_B = Z_1 \frac{Z + iZ_1 \operatorname{tg} kl}{Z_1 + iZ \operatorname{tg} kl}$  — входное сопротивление двухслойной системы;  $Z_0$ ,

$Z$ ,  $Z_1$  — волновые сопротивления соответственно свободного пространства, материалов подложки и покрытия;  $k = 2\pi/\lambda_1$ ,  $\lambda_1$  и  $l$  — соответственно волновое число, длина волны и толщина слоя покрытия [1].

Зависимость модуля коэффициента отражения волны  $\rho$  от толщины  $l$  слоя покрытия представляет собой осциллирующую незатухающую кривую, экстремальные значения которой реализуются при толщинах  $l_M$  слоя покрытия, определяемых из соотношения [2]

$$\frac{l_M}{\lambda_1} = \frac{l}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2ynn_1}{n_1^2 - n^2(1 + y^2)}. \quad (2)$$

Входящие в соотношение (2) коэффициент преломления  $n_1$  вещества покрытия, коэффициент преломления  $n$  и фактор диэлектрических потерь  $y$  вещества подложки связаны с их диэлектрическими параметрами известными уравнениями

$$\epsilon' = n^2(1 - y^2); \quad \epsilon'' = 2ny; \quad \epsilon_1 = n_1^2. \quad (3)$$

При определенных значениях  $n_1$ ,  $n$  и  $y$  полное поглощение падающего электромагнитного излучения в рассматриваемой системе возможно в точках минимума функции  $\rho(l)$  при резонансной толщине слоя покрытия  $l_0 = l_M$  и

при условии достижения величиной  $\rho$  нулевого значения. Принимая в уравнении (1)  $\rho = 0$  и используя в получаемом выражении соотношения (2) и (3), имеем следующее уравнение

$$y = \frac{1}{n} \sqrt{(n_1^2 - n)(n - 1)}. \quad (4)$$

Совместное рассмотрение уравнений (2) и (4) позволяет установить функциональную связь между толщиной  $l_0$  слоя покрытия и диэлектрическими свойствами веществ подложки и покрытия, при которых в системе возникает полное безотражательное поглощение падающего излучения. В частном случае, при отсутствии поглощения излучения в материале подложки системы  $y = 0$ , и уравнение (4) переходит в уравнение  $n_1 = \sqrt{n}$ , совпадающее с известным критерием просветления оптики [3]. Для этого случая, как это следует из уравнения (2), толщина  $l_0$  слоя покрытия становится кратной четверти длины волны  $\lambda_{10}$  в веществе покрытия при резонансном значении  $\lambda = \lambda_0$ . В общем случае, при наличии в системе поглощающей подложки, толщина  $l_0$  слоя покрытия будет меньше величины, кратной  $\lambda_{10}/4$ .

Результаты совместного решения уравнений (2) и (4) представлены на рис. 1 в виде семейств зависимостей  $y$  и  $l_0/\lambda_0$  от  $n$  при различных дискретных значениях  $n_1$ . Как следует из него, безотражательное поглощение излучения в рассматриваемой двухслойной системе возможно при величинах  $n$ , лежащих в интервале значений  $(1, n_1^2)$ . Функции  $y(n)$  имеют максимумы, реализуемые при  $n_M = 2n_1^2/(n_1^2 + 1)$  и  $y_M = (n_1^2 - 1)/2n_1$ .

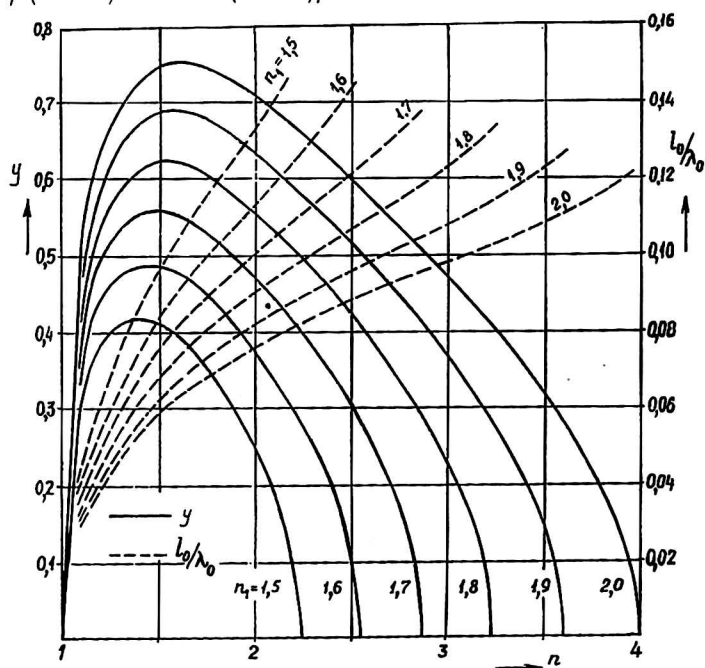


Рис. 1. Зависимости между толщиной  $l_0$  слоя покрытия, фактором диэлектрических потерь  $y$  и коэффициентом преломления  $n$  подложки, соответствующие условию полного гашения электромагнитного излучения в поглощающей двухслойной системе:

$n_1$  — коэффициент преломления покрытия;  $\lambda_0$  — длина волны падающего излучения

В практических задачах представляет интерес оценка полосы избирательного гашения волн в рассматриваемой двухслойной поглощающей системе. Как показано в [4], если при безотражающем гашении падающего излучения в поглощающих системах модуль коэффициента отражения волны  $\rho$  и его производная достигают нулевых значений, то полоса гашения волны может быть определена из следующего соотношения

$$\Delta\lambda = \frac{4\rho_r}{\sqrt{(M')_0^2 + (N')_0^2}}, \quad (5)$$

где  $\rho_r$  — значение модуля коэффициента отражения волны на границе полосы.

Входящие в уравнение (5)  $(M')_0$  и  $(N')_0$  являются производными вещественной и мнимой частей входного сопротивления системы  $Z_B$ , приведенных к волновому сопротивлению свободного пространства  $Z_0$  при  $\lambda = \lambda_0$ . Для рассматриваемой системы

$$M = \frac{n(1+a^2)}{a^2n^2(1+y^2) - 2yan n_1 + n_1^2}; \quad N = \frac{a[n^2(1+y^2) - n_1^2] - ynn_1(1-a^2)}{n_1[a^2n^2(1+y^2) - 2yan n_1 + n_1^2]},$$

где  $a = \text{ctg} 2\pi l/\lambda_1$ .

Используя эти выражения для  $M$  и  $N$  в уравнении (5), получим с учетом условий (2) и (4) безотражательного гашения волн следующее соотношение для относительной полосы гашения волн в двухслойной системе диэлектрик—поглощающий диэлектрик

$$\frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{2\lambda_{10}n_1}{\pi l_0(n_1^2 - 1)}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при выбранном уровне  $\rho_r$  отсчета полосы гашения вблизи  $\lambda = \lambda_0$  ее величина зависит от свойств просветляющего покрытия и отношения  $l_0/\lambda_{10}$ , связанного, в свою очередь, уравнением (2) с диэлектрическими свойствами поглощающей подложки и покрытия. Наименьшая полоса гашения создается в рассматриваемой системе при отсутствии в ней поглощения. В этом случае  $y = 0$ , отношение  $l_0/\lambda_{10}$  становится равным 1/4, а уравнение (6) упрощается и приводится к виду

$$\frac{1}{\rho_r} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{8n_1}{\pi(n_1^2 - 1)}. \quad (7)$$

При наличии поглощения в материале подложки условия безотражательного гашения излучения создаются при значениях  $l_0/\lambda_{10} < 1/4$  и полоса гашения возрастает по сравнению с полосой непоглощающей системы.

На рис. 2 представлены вычисленные по уравнениям (6) и (7) зависимости приведенных значений относительной полосы гашения  $\Delta\lambda/\rho_r\lambda_0$  от резонансных значений  $n$  материала подложки. Они свидетельствуют о том, что при заданном уровне  $\rho_r$  относительная полоса гашения при  $\lambda = \lambda_0$  повышается с понижением  $n$ . Изменение величины  $n_1$  при заданном значении  $n$  приводит к относительно небольшому увеличению полосы. Следует отметить, что из-за периодичности функции  $\rho(l)$  условия безотражательного гашения волн могут выполняться при толщинах слоя покрытия, отстоящих друг от друга на расстояниях  $\lambda_{10}/2$ . Поэтому при формировании просветляющих покрытий по-

вышение резонансной толщины слоя покрытия будет приводить в соответствии с уравнением (6) к существенному снижению полосы гашения волн в системе.

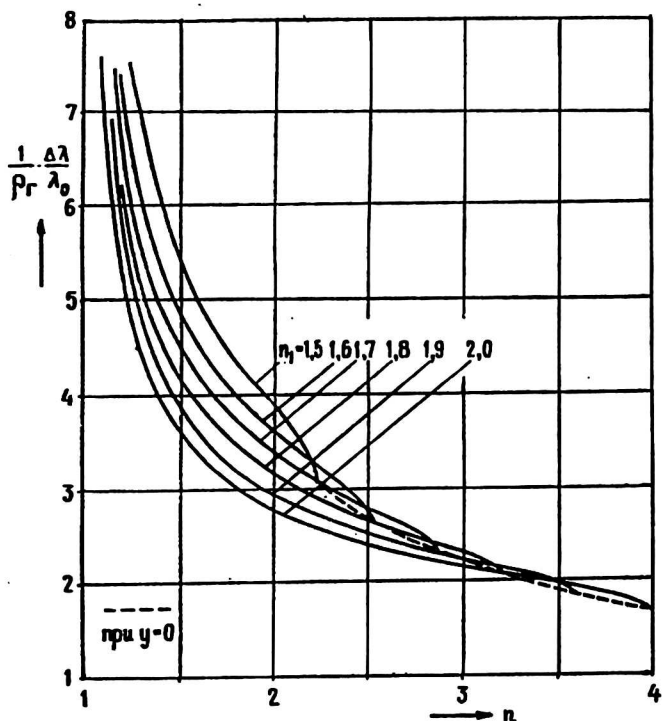


Рис. 2. Зависимости между приведенными значениями относительной полосы поглощения  $\Delta\lambda/\rho\Gamma\lambda_0$  и резонансными значениями коэффициентов преломления подложки  $n$  и покрытия  $n_1$

В отличие от материала покрытия диэлектрические и оптические характеристики материала подложки зависят от частоты. Поэтому выбор материала просветляющего покрытия и его толщины, при которых выполняются условия полного поглощения излучения в подложке, становится однозначным, если известны частотные зависимости  $y$ ,  $n$  или  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  материала подложки. Характер их поведения определяется молекулярной или атомной природой дисперсии волн материала подложки. Для микроволнового диапазона волн дисперсия веществ имеет релаксационную природу и связана с процессами ориентации дипольных молекул по направлению прикладываемого внешнего электрического поля. Для большинства полярных веществ изменение их диэлектрических свойств с частотой достаточно хорошо описывается уравнениями Дебая

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \epsilon'' = \omega\tau \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (8)$$

где  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_\infty$  — соответственно недисперсионные статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости вещества;  $\tau$  — время релаксации;  $\omega$  — круговая частота [5].

Как следует из уравнений (8), зависимость  $\epsilon''$  от  $\epsilon'$  в координатной плоскости  $[\epsilon', \epsilon'']$  представляет собой полуокружность радиуса  $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/2$  с центром в точке  $(\epsilon_0 + \epsilon_\infty)/2$ , расположенной на оси абсцисс (рис. 3, кривая *a*). Для удобства дальнейшего рассмотрения задачи трансформируем с помощью уравнений (3) полученное семейство кривых рис. 1 на координатную плоскость  $[\epsilon', \epsilon'']$  и совместим его с дебаевской полуокружностью. В этом случае геометрические точки пересечения ее с кривыми трансформированного семейства позволяют оценить величины  $n_1$  и  $l_0$ , при которых создаются условия для полного поглощения падающего излучения в системе при заданных значениях диэлектрических характеристик вещества подложки.

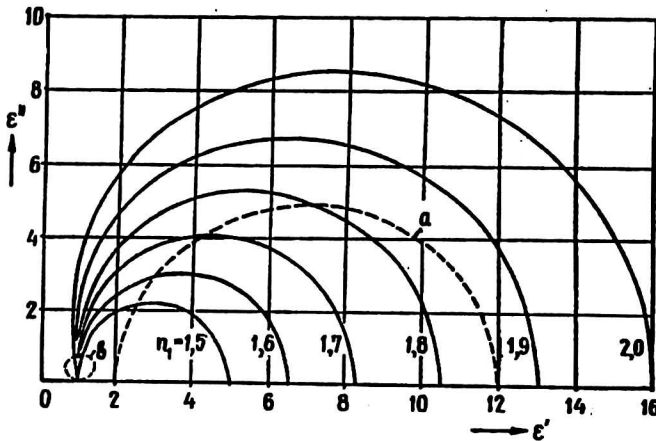


Рис. 3. Зависимости между диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'$  и диэлектрическими потерями  $\epsilon''$  подложки при различных значениях коэффициента преломления  $n_1$  покрытия, соответствующие условию полного гашения электромагнитного излучения в поглощающей двухслойной системе. Характерные зависимости  $\epsilon''$  от  $\epsilon'$  при существовании в веществе дисперсии волн релаксационного (*a*) и резонансного (*b*) типов

В инфракрасном диапазоне волн дисперсия веществ носит, как правило, резонансный характер и связана с колебательными процессами электронов в атомах и молекулах вещества. Диэлектрические свойства вещества в области резонансной дисперсии волн описываются уравнениями вида

$$\epsilon' = 1 + \frac{4\pi N_1 q^2}{m} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}; \quad \epsilon'' = \frac{4\pi N_1 q^2}{m} \frac{\gamma \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \quad (9)$$

где  $\omega_0$  — резонансная круговая частота;

$q, m$  — заряд и масса электрона;

$\gamma$  — коэффициент затухания колебательной системы;

$N_1$  — число частиц в единице объема.

Зависимость  $\epsilon''$  от  $\epsilon'$  для этого типа дисперсии волн представляет кривую, близкую к окружности (см. рис. 3, кривая *b*). Как и в рассмотренном выше случае релаксационной дисперсии волн, геометрические точки пересечения ее с тем же семейством кривых позволяют оценить величины  $n_1$  и  $l_0$  покрытия, при которых при заданных свойствах подложки происходит полное поглощение падающего на систему инфракрасного излучения.

Кривые рис. 3 иллюстрируют графические представления об условиях возникновения в системе полного поглощения излучения. Более точные данные

о  $n_1$  и  $l_0$  для обоих рассмотренных случаев могут быть получены из совместного решения системы уравнений (2)—(9).

### Л и т е р а т у р а

1. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1965. Ч. 1.
2. Ван де Виле Ф. // Сб.: Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. — М.: Мир, 1979. С. 28.
3. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. — М., 1957.
4. Касимова С. Р., Садыхов М. А., Касимов Р. М., Каджар Ч. О. // Инженерно-физический журнал. 1999. Т. 72. № 4. С. 736—738.
5. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. — М.: Стандарты, 1972. — 412 с.

## The translucence of heat receivers of electromagnetic radiation

*Ch. O. Qajar, R. M. Kasimov, S. R. Kasimova*

Institute of Photoelectronics of Azerbaijan Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

*The dependence of conditions and translucence band of receivers of electromagnetic radiation from thickness of layer and dielectric properties of translucence blanket, and also from dielectric properties and nature of wave dispersion of absorptive substance are investigated.*