

Безотражательное гашение электромагнитного излучения в слоистой системе диэлектриков

Э. Р. Касимов

Институт фотоэлектроники НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

Найдены условия безотражательного гашения электромагнитного излучения в слоистой плоской системе, содержащей нанесенный на металлическую подложку поглощающий слой диэлектрика и четвертьволновые непоглощающие слои. Исследована зависимость этих условий от толщины и диэлектрических свойств вещества поглощающего слоя, а также от соотношения между значениями диэлектрических проницаемостей веществ согласующих четвертьволновых слоев.

В работе [1] были теоретически найдены условия возникновения безотражательного поглощения электромагнитного излучения в плоском слое диэлектрика, нанесенном на металлическую подложку. Установлено, что при заданной частоте падающего излучения полное поглощение волны в такой двухслойной системе происходит при строго определенных избирательных значениях диэлектрической проницаемости ϵ' , диэлектрических потерь ϵ'' и толщины l вещества слоя покрытия, при которых входное сопротивление системы $Z_{\text{вх}}$ становится равным волновому сопротивлению вакуума Z_0 . Экспериментальное подтверждение существования этого явления было получено в работе [2] на примере исследования характеристик отражения микроволн бинарными растворами полярных молекул.

Очевидно, что для вещества покрытия, диэлектрические свойства которого не соответствуют этим избирательным значениям, условия безотражательного поглощения волны могут быть достигнуты согласованием входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ с Z_0 с помощью трансформатора сопротивлений [3]. В качестве последнего возможно использование m плоских четвертьволновых непоглощающих диэлектрических слоев, последовательно наносимых на поглощающий слой вещества покрытия.

Рассмотрим задачу отражения плоскополяризованной волны при нормальном ее падении на подобную многослойную систему, состоящую из последовательно нанесенных на металлическую подложку поглощающего слоя вещества и ряда четвертьволновых непоглощающих слоев. При заданной частоте излучения вещество поглощающего слоя имеет комплексное значение диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$, а диэлектрические проницаемости веществ остальных последовательно прилегающих m четвертьволновых непоглощающих слоев равны,

соответственно, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_m$. Полному поглощению волны в такой системе соответствует условие

$$kZ_{\text{th}}\gamma l = Z_0, \quad (1)$$

где Z, γ, l — соответственно, волновое сопротивление, постоянная распространения волны и толщина слоя поглощающего вещества покрытия [3].

В уравнении (1) коэффициент трансформации k , составленный из входящих в систему непоглощающих слоев трансформатора сопротивлений, равен

$$k = \frac{\epsilon_1 \epsilon_3 \epsilon_5 \dots}{\epsilon_2 \epsilon_4 \epsilon_6 \dots}. \quad (2)$$

Постоянная распространения волны γ у поглощающего вещества равна

$$\gamma = i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\hat{\epsilon}} = i \frac{2\pi}{\lambda_g} (1 - iy), \quad (3)$$

где λ, λ_g — длина волны, соответственно, в вакууме и в веществе поглощающего слоя покрытия;

$y = \text{tg} \delta / 2$ — фактор диэлектрических потерь поглощающего вещества; $\delta = \arctg \epsilon'' / \epsilon'$.

Подставляя выражения (2) и (3) в уравнение (1), имеем

$$\text{th}(2\pi x + i2\pi y) = \frac{n}{k} (1 - iy), \quad (4)$$

где $x = l/\lambda_g$; $n = \lambda/\lambda_g$ — коэффициент преломления поглощающего вещества покрытия.

Коэффициент преломления n и фактор диэлектрических потерь y вещества поглощающего слоя связаны с его диэлектрической проницаемостью ϵ' и диэлектрическими потерями ϵ'' известными уравнениями

$$\epsilon' = n^2(1 - y^2); \quad \epsilon'' = 2n^2 y. \quad (5)$$

Разделим уравнение (4) на мнимые и вещественные части. После соответствующих преобразований получим два уравнения, которые описывают условия безотражательного поглощения волны в рассматриваемой системе

$$y \operatorname{sh} 4\pi x y + \sin 4\pi x = 0; \quad (6)$$

$$\frac{n(1+y^2)}{k} = \operatorname{th} 2\pi x y - y \operatorname{tg} 2\pi x. \quad (7)$$

Из совместного решения (6) и (7) имеем

$$\operatorname{th} 4\pi x y = \frac{2nk}{n^2(1+y^2) + k^2}; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} 4\pi x = \frac{2nyk}{n^2(1+y^2) - k^2}. \quad (9)$$

В работе [4] установлено, что в отсутствие трансформатора сопротивлений безотражательное поглощение электромагнитного излучения в двухслойной системе диэлектрик — металл имеет место в одном из точек минимума осциллирующей и затухающей зависимостей модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l слоя диэлектрика при достижении величиной ρ в этой точке нулевого значения. В этой связи предположим, что условия безотражательного поглощения волны в рассматриваемой системе выполняются в названном нулевом минимуме зависимости $\rho(l)$ при толщинах l_0 поглощающего слоя покрытия, близких к величинам, кратным $\lambda_g/4$. Тогда имеем

$$x = \frac{2N-1}{4} + \Delta, \quad (10)$$

где N — номер нулевого минимума зависимости $\rho(l)$;

Δ — в общем случае малая, но не нулевая величина, определяемая из совместного решения уравнений (9) и (10)

$$\Delta = \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{2nyk}{n^2(1+y^2) - k^2}. \quad (11)$$

Подставив выражение (10) в уравнения (8) и (9) и исключив из них в качестве промежуточного параметра величину Δ , получим

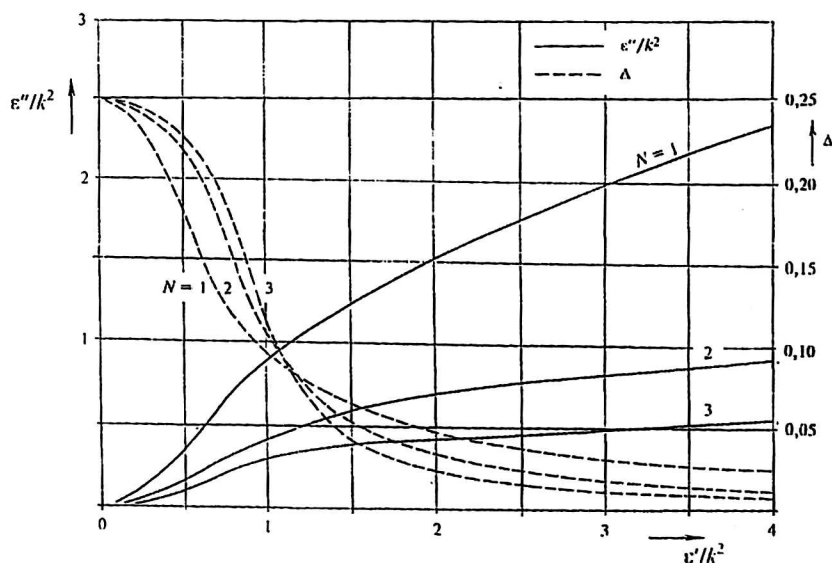
$$\begin{aligned} \pi(2N-1) + \operatorname{arctg} \frac{2nyk}{n^2(1+y^2) - k^2} = \\ = \frac{1}{2y} \ln \frac{(k+n)^2 + (ny)^2}{(k-n)^2 + (ny)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение (12) определяет связь между значениями k , n и y , а следовательно, между ϵ' и ϵ'' вещества поглощающего слоя покрытия и диэлектрическими проницаемостями остальных слоев системы, при которых в системе возникает полное поглощение падающего излучения. Требуемая при этом толщина l_0 поглощающего слоя покрытия находится, как следует из уравнений (10) и (11), из выражения

$$\frac{l_0}{\lambda} = \frac{1}{n} \left[\frac{(2N-1)}{4} + \operatorname{arctg} \frac{2nyk}{n^2(1+y^2) - k^2} \right]. \quad (13)$$

Если пользоваться приведенными значениями $\bar{n} = n/k$, то уравнения (12), (13) будут внешне совпадать с уравнениями, полученными в [4]. В этой связи для удобства анализа результатов решения уравнений (5)–(13) найденные по ним зависимости между избирательными значениями l_0 , ϵ' , ϵ'' вещества поглощающего слоя покрытия и коэффициентом трансформации k представлены с использованием приведенных значений ϵ'/k^2 , ϵ''/k^2 . На рис. 1 даны эти зависимости в координатных плоскостях соответственно $[\epsilon'/k^2, \epsilon''/k^2]$ и $[\Delta, \epsilon'/k^2]$ при значениях $N = 1, 2$ и 3.

Рис. 1. Зависимости между избирательными значениями коэффициента трансформации k согласующего трансформатора сопротивлений, диэлектрической проницаемостью ϵ' , диэлектрическими потерями ϵ'' и величины отклонений Δ толщины поглощающего слоя покрытия от величин, кратных $\lambda_g/4$, при которых в слоистой системе диэлектриков возникает безотражательное поглощение падающего электромагнитного излучения



При заданном коэффициенте трансформации k зависимости ϵ'' от ϵ' с ростом N асимптотически приближаются к оси абсцисс. Это указывает на то, что безотражательное поглощение волны в покрытии может происходить и при слабом затухании волны в его поглощающем слое, но при более высоких величинах его избирательной толщины. При этом характерно, что при $k < 1$ избирательным значениям ϵ' , ϵ'' соответствуют малые величины Δ , и толщины поглощающего слоя оказываются близкими к $\lambda_g(2N-1)/4$. В случае $k > 1$ и малых величин ϵ' вещества поглощающего слоя покрытия значения Δ возрастают и стремятся к значению 0,25. Это свидетельствует о том, что условиям безотражательного поглощения волны при таких значениях k удовлетворяют толщины поглощающего слоя, близкие к полуволновым значениям $\lambda_g N/2$. В качестве иллюстрации подобных изменений избирательных значений ϵ' , ϵ'' и Δ на рис. 2 даны расчетные зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины поглощающего слоя покрытия при различных значениях k . При выбранных значениях $\epsilon' = 3$ и $\epsilon'' = 0,8$ вещества поглощающего слоя с ростом величины k отчетливо наблюдается смещение положения минимальных точек зависимостей $\rho(l)$ в направлении величины l/λ_g , кратной 0,5. При этом полное поглощение волны в покрытии возникало при $k = 1,5$ и $N = 3$.

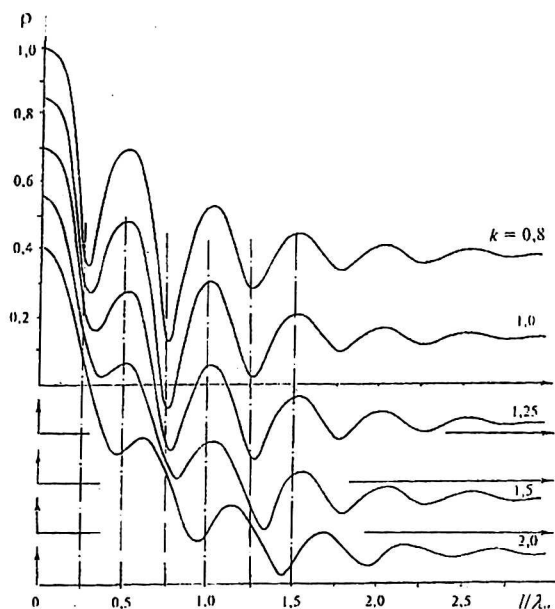


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициента отражения волны ρ от толщины l поглощающего слоя покрытия при различных значениях коэффициента трансформации k согласующего трансформатора сопротивлений

Литература

1. Касимов Р. М. // Инженерно-физический журн., 1994. Т. 65. № 5—6. С. 486—492
2. Касимов Р. М., Калафи М. А., Касимов Э. Р., Каджар Ч. О., Салаев Э. Ю. // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 5. С. 167—171.
3. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. — М.: Сов. радио, 1965. Ч. 1. — 784 с.
4. Касимов Э. Р., Азизов С. Т., Касимов Р. М., Каджар Ч. О. // Известия АН Азербайджана. Сер. физ.-техн. и мат. наук. 1995. № 5—6. С. 22—29.

Reflectionless absorption of electromagnetic radiation in layered system of dielectrics

E. R. Kasimov

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

The conditions of reflectionless absorption of electromagnetic radiation in layered flat system have been found. The system contains from the absorptive layer of dielectric cased over the metal surface and from quarterwaves nonabsorptive layers. The dependence of these conditions from thickness and dielectric properties of substance of absorptive layer and also from relation between values of dielectric permittivities of substances of concurrented quarterwaves layers are investigated.

* * *