

# Аналитический метод оценки влияния малых потерь в слоях периодических двухкомпонентных просветляющих структур со связанными волновыми толщинами слоёв в периоде на их оптические характеристики

А.Е. Жителев,<sup>1,\*</sup> А.В. Козарь<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 05.01.2025; после доработки 23.03.2025; подписана в печать 26.03.2025)

В работе предложен метод оценки влияния малых потерь в слоях периодических двухкомпонентных просветляющих структур со связанными волновыми толщинами в периоде ( $\pi$ -структуры) на их оптические характеристики при помощи простых аналитических соотношений. Показана работоспособность предложенного метода для различных показателей преломления просветляемых сред, коэффициентов поглощения материалов слоев структуры и числа слоев. Корректность полученных результатов подтверждена численным экспериментом.

PACS: 41.20.-q УДК: 537

Ключевые слова: просветляющие многослойные периодические структуры, интерференция.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2530403](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2530403)

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день разработано большое количество аналитических и численных методов анализа и синтеза многослойных периодических структур [1–7]. Аналитические методы представляют особый интерес по той причине, что позволяют находить оптимальные по различным критериям решения, быстро выполнять обобщенный анализ получаемых решений, а также способны показать полное множество всех решений заданной задачей синтеза многослойной интерференционной структуры.

Одним из основных факторов, влияющих на качество синтезируемой многослойной интерференционной структуры, является уровень поглощения энергии электромагнитного излучения в её слоях. В оптике для решения задач синтеза просветляющих покрытий применяются материалы, обладающие сравнительно низким уровнем поглощения электромагнитного излучения [8, 9], однако пренебрежение этим свойством материалов в процессе синтеза структуры может привести к тому, что синтезируемая структура не будет обладать указанными в техническом задании свойствами. Исследованию особенностей распространения электромагнитного излучения в периодических интерференционных структурах с поглощением посвящено немало работ. Однако во всех этих работах рассматриваются либо «классические» периодические структуры с четвертьволновыми или полуволновыми толщинами слоев в периоде [10–14], либо металл-диэлектрические структуры [15–18]. Целью настоящей ра-

боты является нахождение простых аналитических соотношений, позволяющих оценить влияние малых потерь в слоях нового класса периодических многослойных структур ( $\pi$ -структур) на их волновые характеристики — коэффициенты поглощения, отражения и пропускания. Структурной особенностью рассматриваемых  $\pi$ -структур является установленное по определенному алгоритму соотношение оптических толщин слоев в периоде структуры.

## 1. ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ПОТЕРЬ В СЛОЯХ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СТРУКТУР

Определим особенности влияния малого поглощения в слоях интерференционных структур на их оптические характеристики. В качестве допущения, необходимого для упрощения задачи, будем считать, что с многослойной согласующей структурой взаимодействует плоская монохроматическая волна, распространяющаяся в среде с показателем преломления  $n_L$ , причем в случае свободного пространства  $n_L = 1$ .

Для перпендикулярного падения плоской волны по направлению, нормальному слоям интерференционной структуры (не ограниченной в латеральном направлении), в случае наличия поглощения в слоях можно воспользоваться моделью «диэлектрик с потерями» [19, 20]. В этом случае относительная диэлектрическая проницаемость материала слоя записывается в комплексной форме следующим образом:

$$\hat{\epsilon} \equiv \epsilon' + i\epsilon'' = \epsilon' + i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (1)$$

где  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  — действительная и мнимая части соответственно относительной диэлектрической прони-

\* E-mail: [ae.zhitelev@physics.msu.ru](mailto:ae.zhitelev@physics.msu.ru)

цаемости среды,  $\sigma$  — ее удельная проводимость,  $\omega$  — циклическая частота распространяющейся в среде волны,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума. Тогда для комплексного показателя преломления ( $\hat{n}$ ) можно записать:

$$\left(\frac{n'}{k}\right) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} \pm \varepsilon'}{2}}, \quad (2)$$

где

$$(n' + ik)^2 \equiv (\hat{n})^2 = \hat{\varepsilon}, \quad (3a)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}. \quad (3b)$$

Для численных расчётов при решении прямой задачи оптики слоистых сред одним из самых удачных методов является метод импедансных характеристик [21]. В его основе лежат операции не с абсолютными значениями составляющих электромагнитного поля  $E$  и  $H$ , а с относительной величиной, равной отношению их поперечных составляющих — импедансом. Такой подход существенно упрощает вычислительную сторону задачи. Выражение для импеданса слоя с номером  $m$  с учётом поглощения имеет вид:

$$Z_m = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2} + \varepsilon_m'}{2(\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2)}} + \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2} - \varepsilon_m'}{2(\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2)}}. \quad (4)$$

Для постоянной распространения волны в слое с номером  $m$  соответственно имеем:

$$\gamma_m = \frac{\sqrt{2}\pi}{\lambda} \left( \sqrt{\sqrt{\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2} - \varepsilon_m'} + i \sqrt{\sqrt{\varepsilon_m'^2 + \varepsilon_m''^2} + \varepsilon_m'} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве.

## 2. $\pi$ -СТРУКТУРЫ

В работе [22] был предложен метод и на его основе построен универсальный аналитический алгоритм синтеза нового класса многослойных периодических структур. Особенностью алгоритма, предложенного в работе [22], является, в отличие от классических алгоритмов, возможность синтеза многослойных периодических структур, амплитудные характеристики которых зависят не только от числа слоев, но и от соотношения их волновых (оптических) толщин в периоде структуры. Важной особенностью указанного алгоритма является возможность синтеза структур с одновременным выполнением амплитудного требования, вне зависимости от числа слоев, а также обеспечение значения фазы коэффициента отражения от такой структуры,

равной  $\pi$ . Данная особенность определила название этого класса структур — « $\pi$ -структуры». Любая просветляющая двухкомпонентная периодическая структура является  $\pi$ -структурой.

Разработанный в работе [22] аналитический алгоритм синтеза  $\pi$ -структур можно использовать для структур с произвольным числом слоёв, однако в случае, когда число слоёв ( $N$ ) больше пяти, получить решение для толщины слоя в аналитической форме становится чрезвычайно проблематично в силу громоздкости выражений. Использование комплексных показателей преломления в расчёте толщин слоев  $\pi$ -структур для учёта поглощения в слоях также в значительной степени усложняет аналитические преобразования. В работе [23] на основании предложенного в [22] метода был построен численно-аналитический алгоритм синтеза  $\pi$ -структур с произвольным числом слоёв. Численно-аналитический алгоритм синтеза  $\pi$ -структур позволяет значительно упростить решение задачи синтеза, в связи с чем широко используется в настоящей работе.

В настоящей работе, как и в [22], рассматривается нормальное падение плоской монохроматической волны на многослойную структуру с двухслойным периодом и показателями преломления слоев  $n_1$  и  $n_2$  ( $n_2$  — слой, прилегающий к среде с показателем преломления  $n_S$ ),  $N$  — число слоёв,  $K$  — число периодов, которая расположена между средами с действительными показателями преломления  $n_L$  (среда, из которой распространяется волна) и  $n_S$  (просветляемая среда), см. рис. 1.

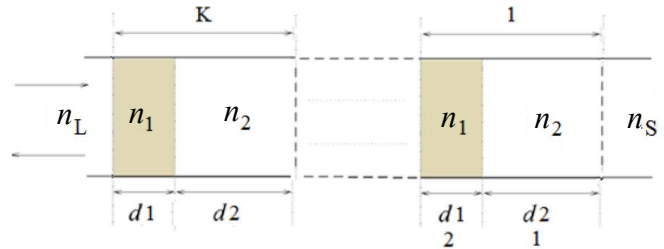


Рис. 1. Согласующая структура с двухслойным периодом

Система связанных уравнений, содержащая все структурные решения для просветляющей двухкомпонентной периодической структуры, имеет вид [22]:

$$n_S = \left| \frac{n_1 T_1 + n_2 T_2}{n_1 T_2 + n_2 T_1} \right| \frac{n_1 n_2}{n_L}, \quad (6)$$

$$1 - \Psi T_2^2 = \frac{U_{K-2}(x)}{U_{K-1}(x)} \sqrt{(1 + (A_c T_2)^2)(1 + T_2^2)}, \quad (7)$$

$$\text{где } \Psi = \begin{cases} P & \text{если } N = 2K \\ B & \text{если } N = 2K + 1 \end{cases},$$

$$T_i = \tan(2\pi n_i d_i / \lambda), \quad (i = 1, 2);$$

$d_{1,2}$  — физическая толщина слоёв,  $U_{K-1}$ ,  $U_{K-2}$  — полиномы Чебышева второго рода:

$$U_K(x) = 2^K \left( x^K - \frac{K-1}{1!2^2} x^{K-2} + \frac{(K-2)(K-3)}{2!2^4} x^{K-4} - \frac{(K-3)(K-4)(K-5)}{3!2^4} x^{K-6} \dots \right);$$

$$p = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1 n_2};$$

$$x = (1 - p A_c (T_2)^2) / \sqrt{(1 + (A_c T_2)^2)(1 + T_2^2)};$$

$$B = \frac{n_2^4 - n_L n_S n_1^2}{n_2^2 (n_L n_S - n_1^2)};$$

$$P = \frac{(n_2^2 - n_L n_S)(n_L n_1^2 - n_S n_2^2)}{n_2^2 (n_L - n_S)(n_L n_S - n_1^2)}.$$

Соотношение (6) можно переписать в виде:

$$T_1 = A_c T_2, \quad (8)$$

$$A_c = \frac{n_1(n_2^2 - n_L n_S)}{n_2(n_L n_S - n_1^2)}. \quad (9)$$

Таким образом, в соответствии с (8), условие связи волновых толщин имеет вид:

$$D_1 = \frac{\lambda}{2\pi} (\arctg(A_c \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi}{\lambda} D_2) + \pi k), \quad (k = 0, 1, 2 \dots)$$

где  $D_2 = \frac{\lambda}{2\pi} (\arctg T_2 + \pi k)$ ,  $(k = 0, 1, 2 \dots)$ ;  $D_1 = d_1 n_1$ ,  $D_2 = d_2 n_2$  — волновые (оптические) толщины слоев в периоде многослойной структуры.

Соотношение (8) устанавливает необходимое для реализации режима полного просветления условие связи волновых толщин слоев в периоде любой двухкомпонентной периодической просветляющей структуры, а второе уравнение системы (7) с учетом условия связи (8) определяет конкретные физические толщины слоев согласующей структуры и минимальное число слоев, начиная с которого уравнение (7) имеет действительные решения.

### 3. ОЦЕНОЧНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ

Поскольку  $\pi$ -структуры, которые рассматриваются в данной работе, и структуры, волновые толщины которых равны  $\lambda_\epsilon/4$  (где  $\lambda_\epsilon$  — длина волны в материале), имеют схожую амплитудно-фазовую характеристику на заданной длине волны, то в ряде случаев возможно их рассматривать как эквивалентные конструкции, т.е. заменить при расчетах конструктивно сложные многослойные структуры на гораздо менее сложные в расчетах однослойные. Такой подход — «метод эквивалентных замещений» — впервые был применен в [25, 26]. В работе [26] этот метод используется для синтеза структур с заданным коэффициентом отражения. Применим подобный подход для оценки величины поглощения в  $\pi$ -структуре.

Для многослойных четвертьволновых структур ранее были получены выражения для оценки коэффициента поглощения при наличии малых потерь

в слоях структуры, которые имеют вид [27]:

$$A_{n_s}^{n_2 < n_1} = \frac{\pi n_1 n_2}{n_1^2 - n_2^2} \left[ \frac{k_1}{n_1} \left( \frac{n_L}{n_2} + \frac{n_S}{n_2} \right) + \frac{k_2}{n_2} \left( \frac{n_L}{n_1} + \frac{n_S}{n_1} \right) \right], \quad (10)$$

$$A_{n_s}^{n_1 < n_2} = \frac{\pi n_1 n_2}{n_2^2 - n_1^2} \left[ \frac{k_1}{n_1} \left( \frac{n_S}{n_2} + \frac{n_2}{n_L} \right) + \frac{k_2}{n_2} \left( \frac{n_1}{n_L} + \frac{n_S}{n_1} \right) \right]. \quad (11)$$

Выражения (10), (11) получены для случая нормального падения плоской волны на многослойную четвертьволновую структуру из среды с показателем преломления  $n_L$ .

## 4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Результаты численных экспериментов представлены в трёх разделах.

В первом разделе проводится расчёт коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) в зависимости от величины  $n_S$  при минимально возможном числе слоёв (в рассматриваемом случае  $N_{min} = 2$  [22]);

во втором разделе проводится исследование зависимости  $A$  от числа слоёв  $\pi$ -структуры;

третий раздел посвящён расчёту зависимости коэффициента поглощения  $A$  от величины мнимой части комплексного коэффициента преломления.

Для синтеза  $\pi$ -структуры с двухслойным периодом в численных экспериментах использовались показатели преломления слоев, соответствующие широко распространенным для работы с ИК-диапазоном материалам  $\text{BaF}_2$  ( $n = 1.45$ ) и  $\text{ZnSe}$  ( $n = 2.55$ ). Исследования проводились для диапазона показателя преломления подложки ( $n_S$ ) такого, что  $n_l^2 < n_S n_L < n_h^2$ , где  $n_l = 1.45$ , что соответствовало материалу с более низким показателем преломления в двухслойном периоде, а  $n_h = 2.55$  — показатель преломления второго материала в двухслойном периоде, оптически более плотного. Данный интервал  $n_S$  интересен в первую очередь тем, что на этом интервале значений  $n_S$  существуют тонкослойные (общая оптическая толщина согласующей структуры существенно меньше  $\lambda/4$ ) решения для согласующей  $\pi$ -структуры [24].

### 4.1. Расчёт коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) в зависимости от $n_s$

Используя указанные выше исходные данные для показателей преломления слоёв и просветляемой среды ( $n_h = 2.55$ ;  $n_l = 1.45$ ;  $n_S = 4$ ), синтезировалась  $\pi$ -структура для длины волны излучения  $\lambda = 10$  мкм, согласующая плоскую волну, распространяющуюся из свободного пространства ( $n_L = 1$ ). Комплексная часть коэффициента

преломления, определяющая уровень поглощения в слое ( $k$ ), была установлена на уровне  $k = 10^{-3}$ . Для полученной структуры были рассчитаны энергетические коэффициенты прохождения ( $T$ ) и отражения ( $R$ ) и определён коэффициент поглощения структуры ( $A$ ) в виде  $A = 1 - T - R$ . Толщины слоёв ( $d_1$  и  $d_2$ ) при этом менялись в зависимости от  $n_S$ . В таблице приведены примеры значений  $d_1$  и  $d_2$ .

Стоит отметить, что коэффициент отражения для такого рода экспериментов оказывался на несколько порядков ниже, чем коэффициент прохождения, поэтому для оценки величины коэффициента прохождения в рассматриваемом случае можно воспользоваться соотношением  $T \approx 1 - A$ . Из рис. 2 видно, что график, данный зависимостями (10, 11) (сплошные кривые), хорошо соотносится с расчётом по точным формулам (точечные кривые) в области низких и высоких значений  $n_S$  и несколько возрастает (не более чем на 3%) относительно расчётных данных в середине диапазона  $n_S$ .

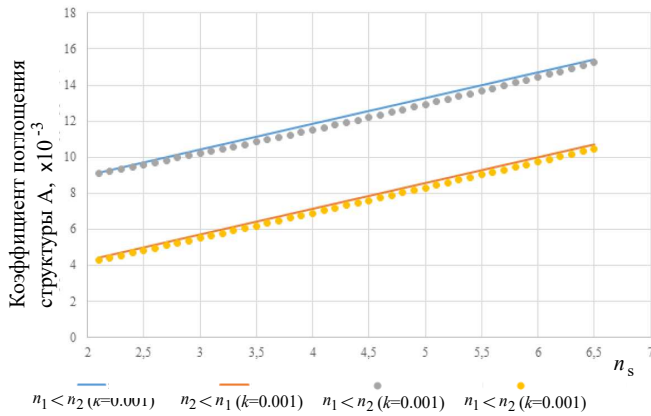


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) от величины показателя преломления ( $n_S$ )

#### 4.2. Исследование зависимости коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) от числа слоёв $\pi$ -структуры ( $N$ )

С помощью численно-аналитического алгоритма, описанного в работе [23], были синтезированы  $\pi$ -структуры с различным числом слоёв, для которых введена мнимая часть показателя преломления (одинаковая для слоёв с  $n_1$  и  $n_2$ )  $k = 10^{-3}$ . Как и в разделе 5.1, были использованы слои структур с показателями преломления материалов  $\text{BaF}_2$  ( $n_2 = 1.45$ ) и  $\text{ZnSe}$  ( $n_1 = 2.55$ ),  $\lambda = 10$  мкм. Показатель преломления подложки ( $n_S$ ) принадлежал диапазону значений  $n_L^2 \leq n_S n_L \leq n_h^2$ , где показатель  $n_L = 1.45$ , а  $n_h = 2.55$  — показатели преломления материалов слоёв. Для того, чтобы понять тенденцию поведения коэффициента поглощения ( $A$ ) в зависимости от числа слоёв структуры и коэффициента преломления подложки, был проведён численный эксперимент для трёх разных значений  $n_S$  (на краях и в центре исследуемого диа-

пазона значений) и различного числа слоёв. Стоит отметить, что для синтеза структур с большим числом слоёв ( $N > 5$ ) использовался численно-аналитический алгоритм, подробно описанный в работе [9]. Так, например, толщины слоёв в периоде структур (для  $n_S = 4$ ) составляли при  $N = 2$ :  $d_1 = 0.7652$  мкм;  $d_2 = 1.2339$  мкм, а при  $N = 40$ :  $d_1 = 0.03558$  мкм;  $d_2 = 0.0272$  мкм. Результаты точных расчётов (точечные кривые) и теоретические зависимости (сплошные кривые), полученные с помощью выражения (11), представлены на рис. 3. Видно, что хотя значение коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) меняется с ростом числа слоёв структуры, относительное изменение этой величины для всего диапазона  $N$  невелико (не более 1.5%). Помимо этого, обращает на себя внимание тот факт, что с ростом показателя преломления подложки ( $n_S$ ) величина  $A$  для большого числа слоёв увеличивается так же, как и для двухслойной структуры, результаты расчёта которой представлены в разделе 5.1.

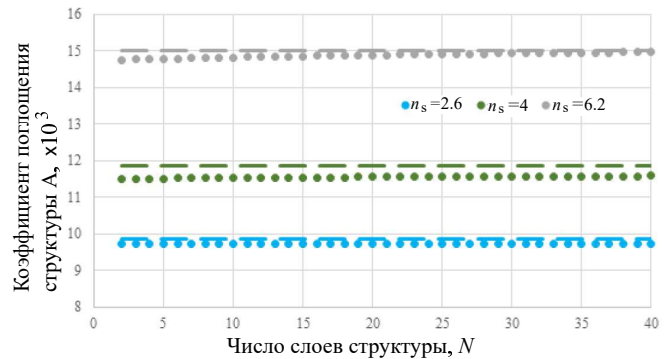


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) от числа слоёв структуры ( $N$ ) для различных  $n_S$

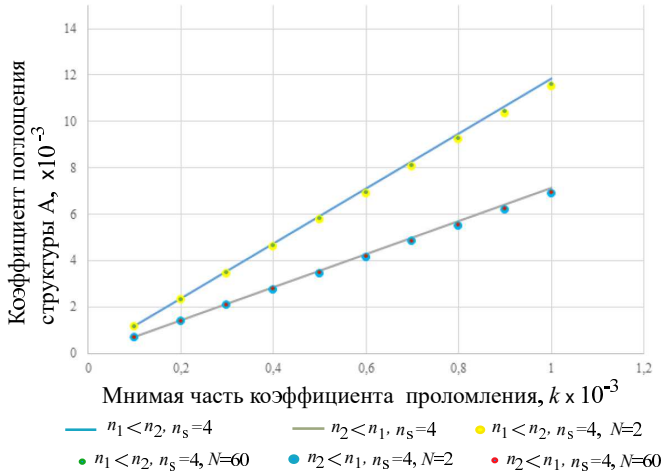
#### 4.3. Зависимость коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) от величины мнимой части коэффициента преломления ( $k$ )

Оптические материалы, используемые в просветляющих структурах, имеют достаточно широкий диапазон значений коэффициента  $k$  [8, 9]. В связи с этим необходимо определить характер поведения зависимости коэффициента поглощения структуры ( $A$ ) от величины  $k$  её слоёв. Рассмотрим для примера зависимость коэффициента поглощения в структуре от величины  $k$  для  $\pi$ -структур с показателями преломления  $n_2 = 1.45$  ( $\text{BaF}_2$ ) и  $n_1 = 2.55$  ( $\text{ZnSe}$ ) и просветляемой средой с показателем преломления  $n_S = 4$ . Здесь, как и в разделе 5.1, сравним зависимости, полученные с помощью выражений (10, 11) (сплошные кривые) и данные точных численных экспериментов для  $\pi$ -структур с разным числом слоёв. При расчётах толщин слоёв  $\pi$ -структур, как и в разделах 5.1–5.2, использовался численно-аналитический алгоритм [23].



Таблица. Толщины слоёв для различных значений  $n_s$  ( $N_{min} = 2$ )

| $n_s$       | 2.1            | 4              | 6.5            |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| $n_1 < n_2$ | $d_1 = 1.3732$ | $d_1 = 0.585$  | $d_1 = 0.0140$ |
|             | $d_2 = 0.0748$ | $d_2 = 0.416$  | $d_2 = 0.9646$ |
| $n_2 < n_1$ | $d_1 = 0.0214$ | $d_1 = 0.7652$ | $d_1 = 0.9737$ |
|             | $d_2 = 2.3406$ | $d_2 = 1.2339$ | $d_2 = 0.0332$ |

Рис. 4. Сравнение результатов численного моделирования и теоретической зависимости, данной выражением 10 и 11 ( $n_s = 4$ ), для  $A(k)$  при  $n_2 < n_1$ ,  $n_1 < n_2$ 

На рис. 4 видно, что теоретические зависимости, данные выражениями (10–11), повторяют характер поведения зависимостей  $A(k)$ , определённых в численных экспериментах с  $\pi$ -структурами — как для варианта, где  $n_1 = 2.55$ ,  $n_2 = 1.45$  (т.е.  $n_2 < n_1$ ), так и для варианта, где  $n_1 = 1.45$ ,  $n_2 = 2.55$  (т.е.  $n_1 < n_2$ ). Как и в представленных выше результатах, из рис. 4 видно, что теоретические зависи-

мости (10,11) дают значение величины  $A$  незначительно выше, чем данные, полученные в численных экспериментах во всём исследуемом диапазоне  $10^{-4} \leq k \leq 10^{-3}$ . Также обращает на себя внимание тот факт, что зависимости  $A(k)$  для  $N = 2$  и  $N = 60$  отличаются незначительно во всём исследуемом диапазоне величины  $k$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнение данных поглощения  $\pi$ -структур, полученных как в численных экспериментах, так и с помощью соответствующих теоретических зависимостей для многослойных четвертьволновых структур. Представленные результаты позволяют утверждать, что для значений мнимой части показателя преломления слоев структуры  $k \leq 10^{-3}$  и диапазона значений  $n_s$  такого, что  $n_l^2 \leq n_s n_L \leq n_h^2$ , указанные в настоящей работе выражения для многослойных четвертьволновых структур, можно использовать при оценке коэффициента поглощения тонкослойных  $\pi$ -структур с различным числом слоёв ( $N \leq 60$ ). В работе показано, что точный расчёт значения коэффициента поглощения при различных параметрах  $\pi$ -структуры даёт результат с отклонением, составляющим не более 3% от значения аналогичного параметра, полученного с помощью теоретических зависимостей для многослойных четвертьволновых структур.

[1] Abeles // Annalen de Physique. Paris. N 5. (1950).  
[2] Кард П. Анализ и синтез многослойных интерференционных покрытий. Таллин: Валгус, 1971.  
[3] Розенберг Т.В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Наука, 1958.  
[4] Бреховских Л.В. Волны в слоистых средах. М.: АН СССР, 1973.  
[5] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1958.  
[6] Гласко В.Б., Тихонов А.Н., Тихонов А.В. Ж. Вычисл. матем. матем. физ. **14**, № 1. (1974).  
[7] MacLeod A.H. Thin-Film Optical Filters. 4 ed. CRC Press (2010)  
[8] Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений. 4 ed. CRC Press, 2010. В кн.: Физика тонких пленок. Под ред. Г. Хас-са, М. Франкомбра, Р. Гофмана. **8**. М.: Мир, № 7. (1978).

[9] Майссел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок. Справочник. Т. 1. М.: Сов. радио, 1977.  
[10] Козарь А.В., Трофимов А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 5. (2013).  
[11] Козарь А.В., Колесников В.С., Пирогов Ю.А // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **19**, № 1. (1978).  
[12] Баскаков А.Н., Козарь А.В., Колесников В.С., Тихонов А.В. // Письма в ЖТФ, **2**, № 19. (1976).  
[13] Халиуллин Д.Я., Третьяков С.А. // Радиотехн. и электрон.**43**. № 1. (1998).  
[14] Антонец И.В. и др. // Радиотехн. и электрон. **52**, № 4. (2007).  
[15] Глазунов П.С., Вдовин В.А., Андреев В.Г. // Оптика и спектроскопия. **128**, № 9 (2020)  
[16] Пятайки И.И. // Журнал радиоэлектроники. № 10 (2020).  
[17] Novitsky Denis V. et al. // Phys. Rev. B **96**. 235129 (2017).

- [18] Zhang J. et al. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **46**, 32603 (2009).
- [19] Epstein L.I. *Journ. Opt. Soc. Amer.* N 45, 360 (1955).
- [20] Macleod H.A. *Thin-Film Optical Filters*. London, 1969.
- [21] Thelen A. *Opt. Soc. Amer.* N 56, 1533 (1966).
- [22] Козарь А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 6. (2020). (A.V. Kozar // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 6. 92 (2020).)
- [23] Жителев А.Е., Козарь А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. N 4. 35 (2022). (A.E. Zhitelev, A.V. Kozar // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 4. 35 (2022).)
- [24] Козарь А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. N 3. 54 (2009). (A.V. Kozar // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 3. 54 (2009).)
- [25] Козарь А.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. N 6. 61 (2018). (A.V. Kozar // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **73**, N 6. 61 (2018).)
- [26] Жителев А.Е., Козарь А.В. // Ученые записки физического ф-та Московского ун-та. № 4. (2022).
- [27] Козарь А.В., Пирогов Ю.А., Тихонравов А.В. Влияние резонансного поглощения на оптические характеристики многослойных интерференционных покрытий. *Электр. тех., сер.11, Лазерная техника и оптоэлектроника*, N 5 (1978).

## An analytical method for estimating the effect of small losses in layers of periodic two-component antireflection structures with coupled wave thicknesses of layers in a period on their optical characteristics

A. E. Zhitelev<sup>a</sup>, A. V. Kozar<sup>b</sup>

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

E-mail: <sup>a</sup>[ae.zhitelev@physics.msu.ru](mailto:ae.zhitelev@physics.msu.ru), <sup>b</sup>[avk@phys.msu.ru](mailto:avk@phys.msu.ru)

The paper proposes a method for estimating the effect of low losses in layers of periodic two-component antireflection structures on their optical characteristics using simple analytical ratios. The efficiency of the proposed method is shown for various refractive indices of the illuminated media, absorption coefficients of the materials of the layers of the structure and the number of layers. The correctness of the obtained results is confirmed by numerical experiment.

PACS: 41.20.-q

*Keywords:* antireflection multilayer periodic structures, interference.

*Received 05 January 2025.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

### Сведения об авторах

1. Жителев Александр Евгеньевич — аспирант; e-mail: [ae.zhitelev@physics.msu.ru](mailto:ae.zhitelev@physics.msu.ru).
2. Козарь Анатолий Викторович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: [avk@phys.msu.ru](mailto:avk@phys.msu.ru).