



ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2019.3.6>

УДК 537.87.001

ББК 22.374

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОПУСКАНИЯ ДЛЯ СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СРЕД

Валерий Васильевич Яцышен

Доктор технических наук, профессор кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiori@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Ксения Юрьевна Вережкина

Студент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiori@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Антон Николаевич Попов

Студент кафедры судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
rgiori@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Целью данной работы является расчет отражения и прохождения поляризованной световой волны от слоистой системы наноструктур, образующих периодическую среду.

Расчет проводился двумя методами – методом характеристических матриц и методом, основанным на использовании полиномов Чебышева.

Ключевые слова: слоистые среды, периодические среды, коэффициенты отражения и пропускания, программа расчета, фотонные кристаллы.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется изучению фотонных кристаллов – материалов с упорядоченной структурой, характеризующейся строго периодическим изменением коэффициента преломления в масштабах, сопоставимых с длинами волн излучений в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [1; 2; 4–12; 14–21]. Это динамично развивающееся направление современного материаловедения. Оно связано с возможностью создания светодиодов с высоким КПД, новых типов лазеров с низким порогом генерации, световых волноводов, оптических переключателей, фильтров, а также устройств цифровой вычислительной техники на основе фотоники.

Отличительной особенностью таких материалов является структура, которая характеризуется периодическим изменением показателя преломления. Данные кристаллы всех типов могут рассеивать некоторое излучение при условии, что параметры решетки кристалла имеют тот же порядок, что и длина волны излучения. Подобным образом, будучи прозрачными для широкого диапазона электрического излучения, фотонные кристаллы пропускают свет с длиной волны, сопоставимой с размером структуры фотонного кристалла.

Расчеты

В данной работе рассмотрена плоская волна, которая падает на слоистую периодическую среду (рис. 1).

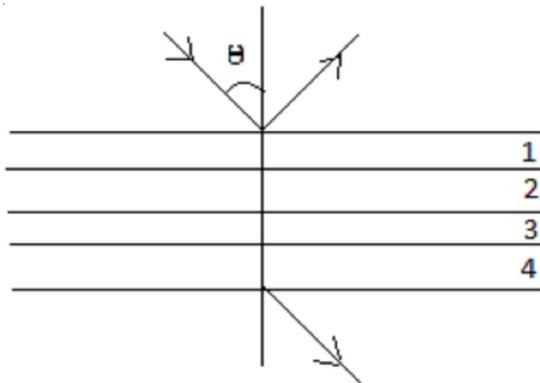


Рис. 1. Падение плоской волны на слоистую периодическую среду (угол падения $\theta = 45^\circ$; толщина слоев: 1 = 100 нм; 2 = 160 нм; 3 = 80 нм; 4 = 120 нм)

Она занимает область от $z = 0$ до $z = z_1$ и с обеих сторон граничит с однородными полубесконечными средами. Получено выражение для амплитуд и интенсивности отраженной и прошедшей волн.

Обозначим A , R и T амплитуды электрических векторов падающей, отраженной и преломленной волн. Пусть ϵ_1 , μ_1 и ϵ_2 , μ_2 – диэлектрические и магнитные проницаемости граничных сред, а θ_1 и θ_2 – углы между нормалью к падающей и прошедшей волнами и направлениями оси z .

Слоистая периодическая среда с периодом h характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ , зависящими только от z ; они имеют вид

$$\epsilon(z + jh) = \epsilon(z) \quad \mu(z + jh) = \mu(z),$$

где j – любое целое число из некоторого фиксированного интервала $1 \leq j \leq N$.

Пусть $M(h)$ – характеристическая матрица, соответствующая одному периоду.

Запишем

$$M(h) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

В этом случае, в соответствии с

$$\begin{cases} Q_0 = M(z_N)Q(z_N) \\ M(z_N) = M_1(z_1)M_2(z_2 - z_1) \dots M_N(z_N - z_{N-1}) \end{cases} \quad (2)$$

и с учетом периодичности среды, получим

$$M[Nh] = M(h)M(h) \dots M(h) = [M(h)]^N. \quad (3)$$

Многослойная система состоит из чередующихся однородных слоев с показателями преломления n_2, n_3, \dots, n_{k-1} и толщинами h_2, h_3, \dots, h_{k+1} , расположенных между двумя однородными средами с показателями преломления n_1 и n_j (рис. 2).

Мы снова считаем среду немагнитной ($\mu = 1$) и полагаем

$$TE \Rightarrow \left. \begin{cases} \beta_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j h_j \cos \theta_j \\ p_j = n_j \cos \theta_j \end{cases} \right\} \quad (4)$$

Характеристическая матрица $M_k(h)$ одного периода имеет вид

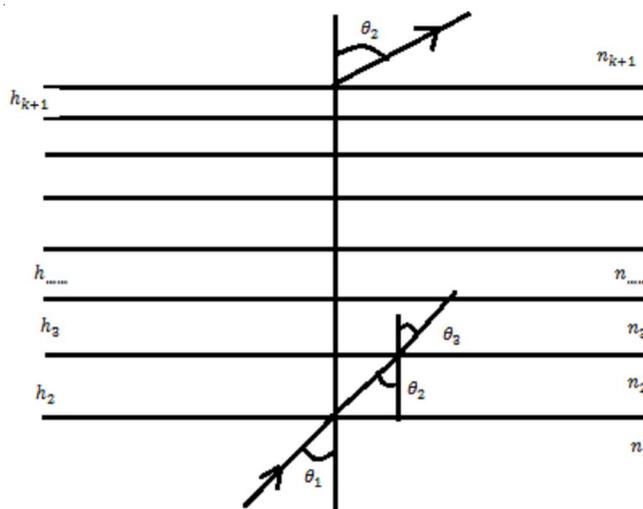


Рис. 2. Периодическая многослойная система

$$M_k(h) = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\frac{i}{p_2} \sin \beta_2 \\ -ip_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & -\frac{i}{p_3} \sin \beta_3 \\ -ip_3 \sin \beta_3 & \cos \beta_3 \end{bmatrix}^* \dots \begin{bmatrix} \cos \beta_{k+1} & -\frac{i}{p_{k+1}} \sin \beta_{k+1} \\ -ip_{k+1} \sin \beta_{k+1} & \cos \beta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Следовательно, в соответствии с выражением (3) характеристическая матрица $M_{kN}(Nh)$ многослойной системы (с полным числом пленок N) будет считаться как произведение:

$$M_{kN}(Nh) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Коэффициенты отражения и пропускания многослойной системы:

$$r = \frac{R}{A} = \frac{(M_{11} + M_{12}p_3)p_2 - (M_{21} + M_{22}p_3)}{(M_{11} + M_{12}p_3)p_2 + (M_{21} + M_{22}p_3)}, \quad (7)$$

$$t = \frac{T}{A} = \frac{2p_2}{(M_{11} + M_{12}p_3)p_2 + (M_{21} + M_{22}p_3)}. \quad (8)$$

Аналогичным образом получаем такую же характеристическую матрицу для волны ТМ-типа:

$$TM \Rightarrow \left. \begin{aligned} \beta_j &= \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j h_j \cos \theta_j \\ q_j &= n_j \cos \theta_j \end{aligned} \right\}$$

Характеристическая матрица $M_k(h)$ одного периода имеет вид

$$h = h_2 + h_3 + \dots + h_{k+1}$$

$$M_k(h) = \begin{bmatrix} \cos \beta_2 & -\frac{i}{q_2} \sin \beta_2 \\ -iq_2 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_3 & -\frac{i}{q_3} \sin \beta_3 \\ -iq_3 \sin \beta_3 & \cos \beta_3 \end{bmatrix}^* \dots \begin{bmatrix} \cos \beta_{k+1} & -\frac{i}{q_{k+1}} \sin \beta_{k+1} \\ -iq_{k+1} \sin \beta_{k+1} & \cos \beta_{k+1} \end{bmatrix}$$

Следовательно, в соответствии с выражением (3) характеристическая матрица $M_{kN}(Nh)$ многослойной системы (с полным числом пленок kN) определяется следующими формулами, полученными Абеле:

$$M_{kN}(Nh) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты отражения и пропускания многослойной системы:

$$r = \frac{R}{A} = \frac{(M_{11} + M_{12}q_3)q_2 - (M_{21} + M_{22}q_3)}{(M_{11} + M_{12}q_3)q_2 + (M_{21} + M_{22}q_3)},$$

$$t = \frac{T}{A} = \frac{2q_2}{(M_{11} + M_{12}q_3)q_2 + (M_{21} + M_{22}q_3)}.$$

Также для реализации расчета периодической слоистой среды вместо прямого произведения характеристических матриц можно воспользоваться расчетом результирующей матрицы с помощью полиномов Чебышева [3]:

$$[M(h)]^N = \begin{bmatrix} m_{11}U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) & m_{12}U_{N-1}(a) \\ m_{21}U_{N-1}(a) & m_{22}U_{N-1}(a) - U_{N-2}(a) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$a = \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}), \quad (10)$$

а U_N – полиномы Чебышева второго рода:

$$U_N(x) = \frac{\sin[(N+1)\arccos x]}{\sqrt{1-x^2}}. \quad (11)$$

Эти полиномы удовлетворяют следующим условиям ортогональности и нормировки:

$$\int_{-1}^{+1} U_m(x)U_n(x)\sqrt{1-x^2} dx \begin{cases} 0; n \neq m \\ \frac{\pi}{2}; n = m \end{cases}$$

Существует возможность подсчетов полиномов Чебышева по рекуррентной формуле:

$$\begin{aligned} U_0(x) &= 1 \\ U_1(x) &= 2x \\ U_{n+1}(x) &= 2xU_n(x) - U_{n-1}(x) \end{aligned}$$

В частности, получим:

$$\begin{aligned} U_2(x) &= 4x^2 - 1 \\ U_3(x) &= 8x^3 - 4x \\ U_4(x) &= 16x^4 - 12x^2 + 1 \\ U_5(x) &= 32x^5 - 32x^3 + 6x \end{aligned}$$

Реализация расчетов на языке C++

Для реализации расчетов было создано консольное приложение на языке C++. В начале опишем вспомогательные компоненты программы. В подключаемом файле Complex.cpp описан класс Complex, реализующий создание и арифметические операции с комплексными числами. В структуре реализованы такие операции, как сложение, умно-

жение комплексных чисел, умножение комплексного числа на рациональное, нахождение сопряженного и модуля. Построение графических объектов осуществляется с помощью программы TLib.h. Далее мы не будем акцентировать внимание на типе данных конкретной переменной. Основное тело программы состоит из единой функции main. Тело функции можно условно разделить на основные части:

1. Создание первичных данных.
2. Расчет необходимых параметров и построение характеристической матрицы для определенного угла падения.
3. Сохранения коэффициентов отражения и пропускания в выходной файл.
4. Построение графического изображения поведения коэффициентов отражения и пропускания для первичной оценки построенной модели.
5. Входными данными программы является: количество слоев N ; толщины слоев $h[N-1]$; показатель преломления $n[N]$, длина волны падающего света l_0 .

Результаты расчетов

1-й результат сравнения.

На рисунке 3 представлен угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания (α – угол падения) при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si). Толщины слоев: 100 нм, 160 нм, 80 нм, 120 нм. Длина падающей волны: 640 нм. Количество повторений структуры: 5. Входные данные программы: $n[N] = \{1, 3.09, 2.38, 1.87, 3.42, 1\}$, $l_0 = 640$, $h[N-1] = \{0, 100, 160, 80, 120\}$, $C = 5$.

На рисунке 4 представлен угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si) при использовании полиномов Чебышева. Толщины слоев: 100 нм, 160 нм, 80 нм, 120 нм. Длина падающей волны: 640 нм. Количество повторений структуры: 5. Входные данные программы: $n[N] = \{1, 3.09, 2.38, 1.87, 3.42, 1\}$, $l_0 = 640$, $h[N-1] = \{0, 100, 160, 80, 120\}$, $C = 5$.

2-й результат сравнения.

На рисунке 5 представлен угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания

ния при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si). Толщины слоев: 100 нм, 160 нм, 80 нм, 120 нм. Длина падающей волны: 640 нм. Количество повторений структуры: 15. Входные данные программы: $n[N] = \{1, 3.09, 2.38, 1.87, 3.42, 1\}$, $l_0 = 640$, $h[N-1] = \{0, 100, 160, 80, 120\}$, $C = 15$.

На рисунке 6 представлен угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si) при использовании полиномов Чебышева. Толщины

слоев: 100 нм, 160 нм, 80 нм, 120 нм. Длина падающей волны: 640 нм. Количество повторений структуры: 15. Входные данные программы: $n[N] = \{1, 3.09, 2.38, 1.87, 3.42, 1\}$, $l_0 = 640$, $h[N-1] = \{0, 100, 160, 80, 120\}$, $C = 15$.

Выводы

В результате выполнения данной работы был описан алгоритм созданного пакета прикладных программ, который получил официальную регистрацию в реестре программ

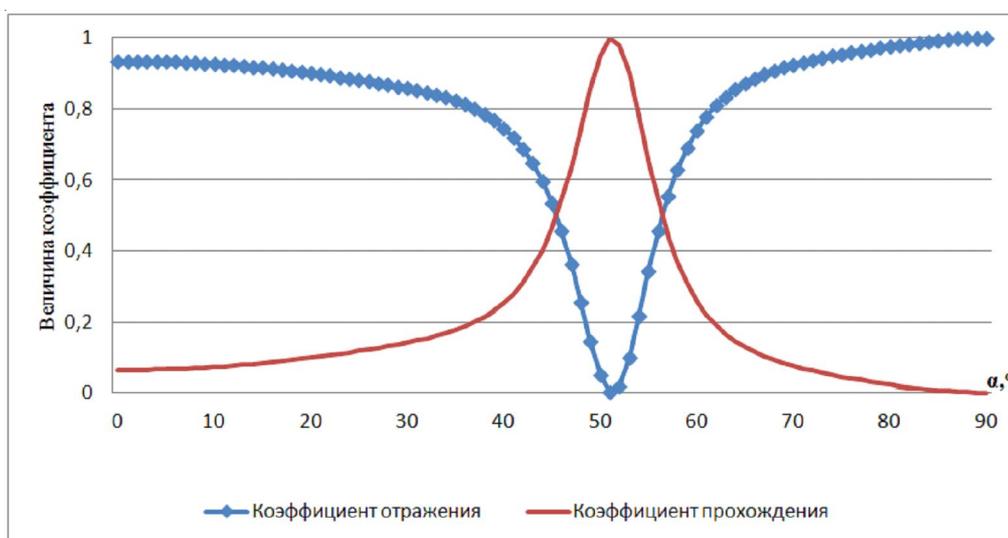


Рис. 3. Угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания (α – угол падения) при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si)

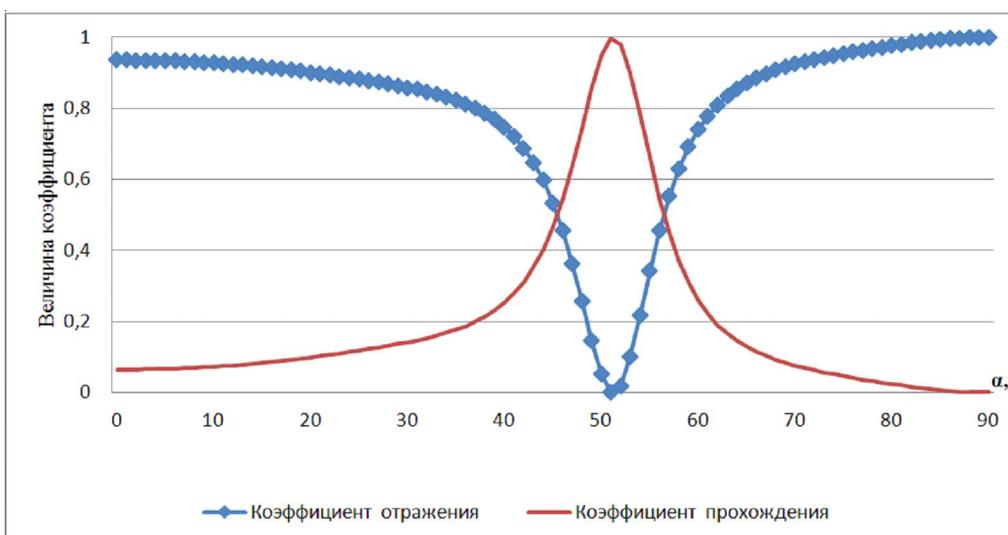


Рис. 4. Угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру (MgO/C/AsBr₃/Si) при использовании полиномов Чебышева

для ЭВМ [13]. Проведены расчеты энергетических коэффициентов отражения и пропускания для слоистой периодической среды из следующих компонентов: слой оксида магния MgO толщиной 100 нм, слой алмаза толщиной 160 нм, слой мышьяка трибромид AsBr_3 толщиной 80 нм, слой кремния Si толщиной 120 нм. Показано, что спектральная зависимость этих коэффициентов представляет собой ярко выраженную интерференционную картину. Из этой картины можно извлекать информацию о структуре слоистой периодической среды. Полученные результаты могут быть положены в основу решения спектральных задач для слоистых периодических сред и фотонных кристаллов. Важным результатом

работы является проведение сравнения метода характеристических матриц и метода на основе полиномов Чебышева: при большем количестве периодов отклонение либо равно 0, либо меньше ограничений языка программирования. Показано, что в целом они дают одинаковые результаты для периодических структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, Ю. М. Модель диэлектрической проницаемости металлических и полупроводниковых наноструктур при учете анизотропии и пространственной дисперсии : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Александров Юрий Михайлович. – Самара, 2016.

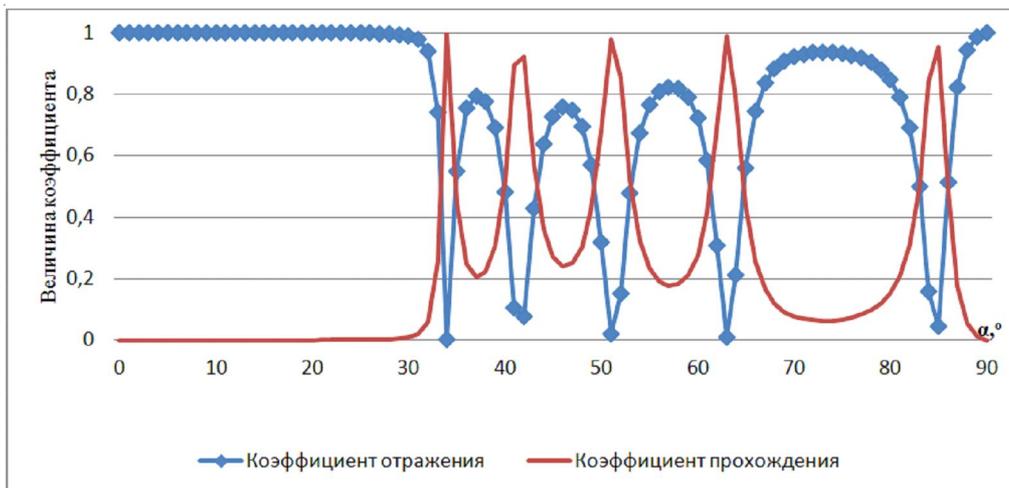


Рис. 5. Угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру ($\text{MgO/C/AsBr}_3/\text{Si}$)

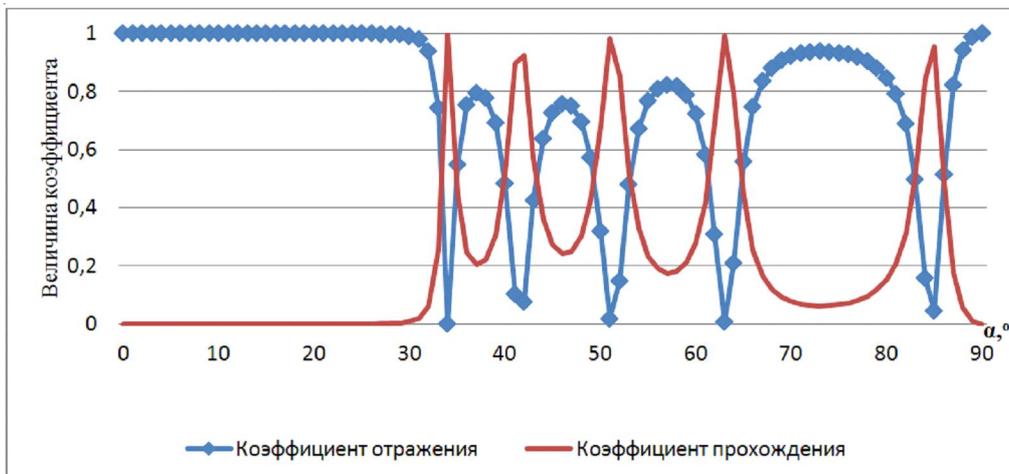


Рис. 6. Угловой спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру ($\text{MgO/C/AsBr}_3/\text{Si}$) при использовании полиномов Чебышева

2. Белотелов, В. И. Фотонные кристаллы и другие материалы / В. И. Белотелов, А. К. Звездин. – М. : Бюро Квантум, 2006. – 144 с.

3. Борн, М. Основы оптики: книга / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина ; под ред. Г. П. Мотулевич. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1973.

4. Горелик, В. С. Оптические и диэлектрические свойства наноструктурированных фотонных кристаллов, заполненных сегнетоэлектриками и металлами / В. С. Горелик // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 7. – С. 1252–1258.

5. Елисеев, А. А. Физические свойства веществ в нанокристаллическом состоянии: методические материалы / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин. – М., 2007. – 61 с.

6. Калитеевский, М. А. Программа для расчета распространения света в слоистых средах / М. А. Калитеевский. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.edu.ioffe.ru/wmw/n4/layer.zip>. – Загл. с экрана.

7. Калитеевский, Н. И. Волновая оптика / Н. И. Калитеевский. – М. : Высшая школа, 1995. – 463 с.

8. Кособукин, В. А. Оптика квазидвумерных экситонов в ограниченных периодических структурах. Поляризационные эффекты / В. А. Кособукин, М. М. Моисеева // Физика твердого тела. – 1995. – Т. 37, № 12. – С. 3694–3703.

9. Кособукин, В. А. Фотонные кристаллы / В. А. Кособукин. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://wmw-magazine.ru/uploads/volumes/04/04.pdf>. – Загл. с экрана.

10. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учеб. пособие / Б. М. Балоян [и др.]. – М., 2007. – 125 с.

11. Новиков, Л. С. Перспективы применения наноматериалов в космической технике : учеб. пособие / Л. С. Новиков, Е. Н. Воронина. – М. : Университетская книга, 2008. – 188 с.

12. Оптика наноструктур / под ред. А. В. Федорова [и др.]. – СПб. : Недра, 2005. – 326 с.

13. Свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ №2019614152. Программа для расчета коэффициентов пропускания и отражения слоистых и периодических сред / правообладатель: Вережкина Ксения Юрьевна. – Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ: 01 апреля 2019 г.

14. Синицкий, А. С. Синтез и оптические свойства фотонных кристаллов на основе диоксида кремния / А. С. Синицкий. – М., 2003.

15. Соловьев, В. Г. Экспериментальное исследование физических свойств регулярных матричных композитов и слоистых систем с нанострукту-

рированными неорганическими и органическими веществами : дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Соловьев Владимир Гаевич. – СПб., 2005.

16. Структура и оптические свойства слоистых нанокомпозитов ZnSe/SiO₂ / П. Н. Крылов [и др.] // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 7. – С. 69–73.

17. Структурные параметры синтетических опалов: статистический анализ данных электронной микроскопии / К. Б. Самусев, Г. Н. Юшин, М. В. Рыбин, М. Ф. Лимонов // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50, вып. 7. – С. 1230–1236.

18. Ченцов, А. В. Разработка дискретно-континуальных моделей деформирования и разрушения наноматериалов : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Ченцов Александр Викторович. – М., 2008. – 120 с.

19. Шабанов, В. Ф. Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности : учеб. пособие / В. Ф. Шабанов, С. Я. Ветров, А. В. Шабанов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. – 209 с.

20. Яблокова, Л. В. Моделирование распространения электромагнитного излучения методом совместного разностного решения волнового уравнения и уравнений Максвелла : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Яблокова Людмила Вениаминовна. – Самара, 2018. – 16 с.

21. Яников, М. В. Оптические свойства фотонных кристаллов и гибридных металлodieлектрических структур на основе опалов : дис. ... канд. физ.-мат. наук / Яников Михаил Владимирович. – Псков, 2016. – 162 с.

REFERENCES

1. Aleksandrov Yu.M. *Model dielektricheskoy pronitsaemosti metallicheskih i poluprovodnikovyykh nanostruktur pri uchete anizotropii i prostranstvennoy dispersii: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Model of Dielectric Permittivity of Metal and Semiconductor Nanostructures Taking into Account Anisotropy and Spatial Dispersion. Cand. phys. and math. sci. diss.]. Samara, 2016.

2. Belotelov V.I., Zvezdin A.K. *Fotonnye kristally i drugie materialy* [Photonic Crystals and Other Materials]. Moscow, Byuro Kvantum Publ., 2006. 144p.

3. Born M., *Osnovy optiki: kniga* [Basics of Optics. Book]. Moscow, Nauka Publ., 1973.

4. Gorelik V.S. *Opticheskie i dielektricheskie svoystva nanostrukturirovannykh fotonnykh kristallov, zapolnennykh segnetoelektrikami i metallami* [Optical and Dielectric Properties of Nanostructured Photonic Crystals Filled with Ferroelectrics and Metals]. *Fizika tverdogo tela*

[Semiconductors or Physics of the Solid State], 2009, vol. 51, iss. 7, pp. 1252-1258.

5. Eliseev A.A., Lukashin A.V. *Fizicheskie svoystva veshchestv v nanokristallicheskom sostoyanii: metodicheskie materialy* [Physical Properties of Substances in Nanocrystalline State. Methodical Materials]. Moscow, 2007. 61 p.

6. Kaliteevskiy M.A. *Programma dlya rascheta rasprostraneniya sveta v sloistykh sredakh* [Program for Calculating the Propagation of Light in Layered Media]. URL: <http://www.edu.ioffe.ru/wmw/n4/layer.zip>.

7. Kaliteevskiy N.I. *Volnovaya optika* [Wave Optics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1995. 463 p.

8. Kosobukin V.A., Moiseeva M.M. Optika kvazidvumernykh eksitonov v ogranichennykh periodicheskikh strukturakh. Polarizatsionnye efekty [Optics of Quasi-Two-Dimensional Excitons in Bounded Periodic Structures. Polarization Effects]. *Fizika tverdogo tela* [Semiconductors or Physics of the Solid State], 1995, vol. 37, no. 12, pp. 3694-3703.

9. Kosobukin V.A. *Fotonnye kristally* [Photonic Crystals]. URL: <http://wmw-magazine.ru/uploads/volumes/04/04.pdf>.

10. *Klassifikatsiya, osobennosti svoystv, primeneniye i tekhnologii polucheniya: ucheb. posobie* [Nanomaterials. Classification, Features of Properties, Application and Technologies of Production. Study Guide]. Moscow, 2007. 125 p.

11. Novikov L.S., Voronina E.N. *Perspektivy primeneniya nanomaterialov v kosmicheskoy tekhnike: ucheb. posobie* [Prospects of Application of Nanomaterials in Space Technology. Study Guide]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2008. 188 p.

12. Fedorov A.V. et al., eds. *Optika nanostruktur* [Optics of Nanostructures]. Saint Petersburg, Nedra Publ., 2005. 326 p.

13. Verevkina K.Yu. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii dlya EVM №2019614152. Programma dlya rascheta koeffitsientov propuskaniya i otrazheniya sloistykh i periodicheskikh sred* [Certificate of State Registration for Computers no. 2019614152. Program for Calculating Transmittance and Reflection Coefficients of Layered and Periodic Media]. Date of State Registration in the Register of Computer Programs April 1, 2019.

14. Sinitskiy A.S. *Sintez i opticheskie svoystva fotonnykh kristallov na osnove dioksida kremniya* [Synthesis and Optical Properties of Silicon Dioxide-Based Photonic Crystals]. Moscow, 2003.

15. Solovyev V.G. *Ekspperimentalnoe issledovanie fizicheskikh svoystv regulyarnykh matrichnykh kompozitov i sloistykh sistem s nanostrukturirovannymi neorganicheskimi i organicheskimi veshchestvami: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk* [Experimental Study of Physical Properties of Regular Matrix Composites and Layered Systems with Nanostructured Inorganic and Organic Substances. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Saint Petersburg, 2005.

16. Krylov P.N. et al. *Struktura i opticheskie svoystva sloistykh nanokompozitov ZnSe/SiO₂* [Structure and Optical Properties of Layered ZnSe/SiO₂ Nanocomposites]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Applied Physics], 2016, vol. 86, no. 7, pp. 69-73.

17. Samusev K.B., Yushin G.N., Rybin M.V., Limonov M.F. *Strukturnye parametry sinteticheskikh opalov: statisticheskiy analiz dannykh elektronnoy mikroskopii* [Structural Parameters of Synthetic Opals. Statistical Analysis of Electron Microscopy Data]. *Fizika tverdogo tela* [Semiconductors or Physics of the Solid State], 2008, vol. 50, iss. 7, pp. 1230-1236.

18. Chentsov A.V. *Razrabotka diskretno-kontinualnykh modeley deformirovaniya i razrusheniya nanomaterialov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Development of Discrete-Continuum Models of Deformation and Destruction of Nanomaterials. Cand. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2008. 120 p.

19. Shabanov V.F., Vetrov S.Ya., Shabanov A.V. *Optika realnykh fotonnykh kristallov. Zhidkokristallicheskie defekty, neodnorodnosti: ucheb. posobie* [Optics of Real Photonic Crystals. Liquid Crystal Defects, Inhomogeneities. Study Guide]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2005. 209 p.

20. Yablokova L.V. *Modelirovaniye rasprostraneniya elektromagnitnogo izlucheniya metodom sovmestnogo raznostnogo resheniya volnovogo uravneniya i uravneniy Maksvella: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Simulation of Electromagnetic Radiation Propagation by the Method of Joint Difference Solution of the Wave Equation and Maxwell's Equation. Dr. eng. sci. abs. diss.]. Samara, 2018. 16 p.

21. Yanikov M.V. *Opticheskie svoystva fotonnykh kristallov i gibridnykh metallodielektricheskikh struktur na osnove opalov: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Optical Properties of Photonic Crystals and Hybrid Metal-Dielectric Structures Based on Opals. Cand. phys. and math. sci. diss.]. Pskov, 2016. 162 p.

CALCULATION OF THE ENERGY COEFFICIENTS OF REFLECTION AND TRANSMISSION FOR THE LAYERED PERIODIC MEDIA

Valeriy V. Yatsyshen

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Kseniya Yu. Verevkina

Student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Anton N. Popov

Student, Department of Forensic Science and Physical Materials Science,
Volgograd State University
priori@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. Currently, much attention is paid to the study of photonic crystals – materials with an ordered structure characterized by a strictly periodic change in the refractive index at scales comparable to the wavelengths of radiation in visible and near infrared ranges. This is a dynamically developing direction of modern materials science. It is connected with the possibility of creating LEDs with high efficiency, new types of lasers with low threshold generation, light waveguides, optical switches, filters, as well as digital computing devices based on Photonics.

The aim of this work is to calculate the reflection and transmission of a polarized light wave from a layered system of nanostructures that form a periodic medium.

The calculation is carried out by two methods: the method of characteristic matrices and the method based on the use of Chebyshev polynomials.

The authors have created a basic component of the computer program for calculating the reflection coefficient and the transmittance of layered nanostructures. The paper calculates the spectra of reflection and transmission coefficients and presents the analysis of the results obtained. The basic element is chosen as a basic nanostructure: a layer of magnesium oxide MgO 100 nm thick, a diamond layer 160 nm thick, an arsenic layer AsBr₃ tribromide 80 nm thick, a silicon layer 120 nm thick. The authors compare the two methods used: the results are almost the same, which makes it possible in practice for such structures to use a simpler method for the computational procedure based on Chebyshev polynomials.

Key words: layered media, periodic media, reflection and transmission coefficients, calculation program, photonic crystals.