



www.volsu.ru

# ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

---

---

DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2022.1.4>

УДК 620.22  
ББК 22.379



## ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ В СЛОИСТЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУРАХ

**Ксения Юрьевна Веревкина**

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

**Илья Юрьевич Веревкин**

Аспирант, кафедра математического анализа и теории функции,  
Волгоградский государственный университет  
ММа-191\_417795@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Валерий Васильевич Яцышен**

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

**Аннотация.** Цель данной работы – изучение особенностей свойств плоской волны, падающей на слоистую и периодическую среду с внедренным дефектным слоем. Актуальность изучения фотонных кристаллов обусловлена тем, что данная сфера современного материаловедения широко развивается в мире науки. Подтверждением высокого роста развития является специфика разностороннего применения и внедрения фотонных кристаллов. Например, появляется возможность создания цифровых вычислительных устройств, в основе которых – фотоника. Также не исключена возможность создания новых типов лазеров с наименьшим порогом генерации, высокоэффективных светодиодов опти-

ческих переключателей и световодов. Уникальность фотонных кристаллов заключается в их структуре, свойства которой имеют периодическое изменение показателя преломления. Эти кристаллы в силу своей особенности не пропускают свет с длиной волны, сравнимой со временем кристаллической структуры. Они остаются прозрачными для широкого спектра электрического излучения. Для энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоистых, периодических сред были выведены расчетные формулы. Разработан базовый компонент компьютерной программы для расчета коэффициента отражения и пропускания слоистых наноструктур. Проведен анализ внедренного слоя, в данном случае дефекта в периодической слоистой структуре, такой как фотонный кристалл.

**Ключевые слова:** слоистые среды, плоская волна, коэффициент отражения, коэффициент пропускания, наноструктуры, дефект.

Актуальность изучения фотонных кристаллов обусловлена тем, что данная сфера современного материаловедения широко развивается в мире науки, так как уникальность фотонных кристаллов заключается в их структуре, свойства которой имеют периодическое изменение показателя преломления. Общее описание свойств фотонных кристаллов можно найти в [1; 4; 6; 11]. Основы теории оптики слоистых структур описаны в фундаментальной работе [2]. Это динамично развивающаяся область современного материаловедения. Полное исследование характеристик частиц  $\alpha\text{-SiO}_2$  в синтетических опалах описано в [8]. Структура и оптические свойства слоистых нанокомпозитов  $\text{ZnSe}/\text{SiO}_2$ , полученных методом радиочастотного магнетронного распыления, были изучены в [7]. В [3] изучались свойства новых материалов, созданных в результате наполнения искусственных опалов различными сегнетоэлектриками, такими как нитрит натрия, титанат бария, ниобат лития и др.

Структура фотонных кристаллов является их особой, отличной от других материалов, спецификой. Периодическое изменение показателя преломления является главной особенностью свойств структуры фотонных кристаллов.

Дисперсия таких кристаллов всех типов возможна при одинаковом порядке параметра решетки кристалла и длины волны излучения. Поскольку фотонные кристаллы прозрачны для основного спектра электрического излучения, они не пропускают свет с длиной волны, сравнимой со временем фотонно-кристаллической структуры.

Поскольку производство таких кристаллов является трудоемким и дорогостоящим, важен предварительный анализ гипотетических структур. Например, в [5] представлена программа, решающая задачу – распространение света через слоистую среду. В [12] при участии одного из авторов было рассмотрено распространение акустических волн через слоистую структуру, а в [10] был предложен анализ лазерной термометрии, основанный на отражении и пропускании лазерного излучения диэлектрическим слоем.

Рассмотрим падение плоской гармонической световой волны из вакуума на слоистую периодическую среду, занимающую область от  $z = 0$  до  $z = d$ . Область  $z > d$  представляет собой подложку, заполненную однородным диэлектриком. Слоистая среда состоит из периодически повторяющихся слоев с заданными диэлектрическими постоянными (рис. 1). Требуется раз-

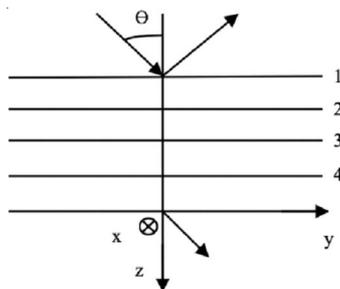


Рис. 1. Геометрия отражения волн от слоистой среды.

Толщина слоя: 1 = 100 нм; 2 = 160 нм; 3 = 80 нм; 4 = 120 нм. Угол падения  $\Theta = 45^\circ$

работать алгоритм и реализовать программный комплекс для расчета коэффициентов отражения и пропускания амплитуды и энергии для такой слоистой периодической среды. Разработанный программный продукт применяется для анализа спектров отражения и пропускания слоистых периодических наноструктур.

Обозначим через  $A$ ,  $R$  и  $T$  амплитуды электрических векторов падающей, отраженной и преломленной волн, а  $\varepsilon_1$ ,  $\mu_1$  и  $\varepsilon_2$ ,  $\mu_2$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости граничных сред, а  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – углы между нормальными к падающей и проходящей волнам и направлениями оси  $z$ .

Эти параметры связаны матричным уравнением:

$$\begin{pmatrix} A + R \\ p_1(A - R) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ p_1 T \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для коэффициентов амплитудного отражения и пропускания получены следующие окончательные результаты:

$$r = \frac{R}{A} = \frac{(m_{11} + m_{12} p_1) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_1)}{(m_{11} + m_{12} p_1) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_1)} \quad (2)$$

$$t = \frac{T}{A} = \frac{2 p_1}{(m_{11} + m_{12} p_1) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_1)} \quad (3)$$

Коэффициент отражения и пропускания, выраженный через  $r$  и  $t$ , имеют вид:

$$RR = |R|^2, \quad TT = \frac{p_1}{p_1} |T|^2 \quad (4)$$

Фазу  $\delta_R$  от  $R$  можно назвать изменением фазы во время отражения, а фазу  $\delta_T$  от  $T$  можно назвать изменением фазы во время передачи. Изменение фазы  $\delta_R$  относится к первому интерфейсу, в то время как  $\delta_T$  относится к плоской границе раздела между слоистой средой и подложкой.

Соответствующие формулы для волны  $p$ -поляризации немедленно получаются из (2)–(4) путем замены величин  $p_1$  и  $p_1$  величинами:

$$q_i = \sqrt{\mu_i / \varepsilon_i} \cos \theta_i.$$

В этом случае  $R$  и  $T$  являются отношением амплитуд магнитных, а не электрических векторов.

Рассмотрим случай однородной диэлектрической пленки, расположенной между двумя однородными средами. Все носители будут считаться немагнитными ( $\mu = 1$ ).

Характеристическая матрица однородной диэлектрической пленки имеет вид:

$$M(z) = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n z \cos \theta) & -\frac{i}{p} \sin(k_0 n z \cos \theta) \\ -i p \sin(k_0 n z \cos \theta) & \cos(k_0 n z \cos \theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\frac{i}{p_1} \sin \beta \\ -i p_2 \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 \quad (7a)$$

и

$$p_j = n_j \cos \theta_j, \quad j = 1, 2, 3. \quad (7b)$$

В случае, когда вместо однородной пленки мы берем слоистую структуру с характерными матрицами слоев  $M_1, M_2, \dots, M_n$ , полученную матрицу можно рассчитать как:

$$M(z_N) = M_1(z_1) M_2(z_2 - z_1)^* \dots * M_n(z_N - z_{N-1}). \quad (8)$$

Причина возможного нахождения матрицы путем умножения заключается в том, что на границе каждого слоя выполняется условие непрерывности векторов столбцов  $\vec{Q}$  на границе каждого слоя.

$$\vec{Q}|_{z_i^-} = \vec{Q}|_{z_i^+} \quad (9)$$

Этот вывод следует из непрерывности составляющих векторов поля  $E_x$  и  $H_y$ , образующих вектор столбца  $\vec{Q}$ .

Из анализа следует, что необходимо создать программный алгоритм, позволяющий нам умножать матрицы отдельных слоев для любого фиксированного количества этих слоев. То же самое относится и к случаю, когда некоторые слои объединяются в отдельную структуру и затем периодически повторяются.

Приложение для реализации вычислений было создано на языке программирования C++. С помощью Complex.cpp включенный в программу файл описывает сложный класс, который реализует создание и арифметические операции с комплексным числом. В структуре реализованы следующие возможности такие как:

сложение и умножение комплексных чисел, умножение комплексного числа на рациональное число, нахождение сопряженного и модуля. Для построения графических объектов используется графическая библиотека Xlib.h. В данном случае рассматривать тип данных конкретной переменной не является первостепенной задачей. Основная часть программы состоит из одной функции, которая называется main.

Основную часть функции можно представить в следующем виде:

1. Создание первичных данных.
2. Расчет необходимых параметров и построение матрицы характеристик для определенного угла падения.
3. Сохранение коэффициентов отражения и пропускания в выходном файле.
4. Построение графического изображения поведения коэффициентов отражения и пропускания для первоначальной оценки построенной модели.

Ниже приведен подробный алгоритм работы программы.

Входными данными программы являются: количество слоев  $N$ ; толщина слоя  $h [N-1]$ ; показатель преломления  $n [N]$ , длина волны падения  $l_0$  (строка 11).

Расчет угла между нормальными к падающей и проходящей волнам  $te [N]$  (строки 20–21), а также  $be [N-1]$  (строка 26) в соответствии с формулой (7а) и  $p [N]$  (строка 23) в соответствии с формулой (7б). Кроме того,  $M [N-1] [2] [2]$  (строки 28–32) – матрица характеристик для каждого слоя рассчитывается по формуле (5). Результирующая матрица  $Mr [2] [2]$  (строки 33–46) – является результатом произведения характеристических матриц по формуле (8). В соответствии с формулами (2), (3), (4), рассчитаны коэффициенты отражения  $R [91]$  и пропускания  $T [91]$  (строки 47–52).

Данные, сохраненные в выходных файлах (строки 53–66): “Rre.txt” является реальной частью изменения фазы при размышлении; “Rim.txt” является мнимой частью изменения фазы при отражении; “Tre.txt” – реальная часть изменения фазы при прохождении; “Tim.txt” – мнимая часть изменения фазы во время передачи; “RR.txt” – коэффициент отражения; “TT.txt” – коэффициент пропускания.

Используя графическую библиотеку, изображение поведения коэффициентов отра-

жения и пропускания строится в виде кусочно-линейного графика (строки 61–83).

```

10. int main()
11. {double A=0.1, n[N]={1,3.09,2.38,1.87,3.42,1},
    p[N],be[N-1],te[N], l0[100],h[N-1] = {0,100,
    160,80,120},RR[100],TT[100],hw[100];
12. Complex Mr[2][2], T[100], R[100], M[N-1]
    [2][2],r,t;
13. int m;
14. hw[0]=0.09;
15. for(m=1;m<100;m++)
16. hw[m]=hw[m-1]+0.09;
17. for(m=1;m<100;m++)
18. l0[m]=299792458*4.135667662(hw[m]
    *1000000);
19. te[0]=3.1416/6;
20. for(int i=1; i<N; i++)
21. te[i]=asin(sin(te[0])*n[0]/n[i]);
22. for(int i=0; i<N; i++)
23. p[i]=cos(te[i])*n[i];
24. for(m=0;m<100;m++)
25. {for(int i=1; i<N-1; i++)
26. { be[i]=6.2832*n[i]*h[i]*cos(te[i])/l0[m];}
27. Complex k(2*p[0],0);
28. for(int i=1; i<N-1; i++)
29. { M[i][0][0].Re=cos(be[i]);
30. M[i][0][1].Im=(-1)*sin(be[i])/p[i];
31. M[i][1][1].Re=cos(be[i]);
32. M[i][1][0].Im=(-1)*sin(be[i])*p[i]}
33. Mr[0][0]=M[1][0][0];
34. Mr[0][1]=M[1][0][1];
35. Mr[1][0]=M[1][1][0];
36. Mr[1][1]=M[1][1][1];
37. for (int i=2; i<N-1;i++)
38. {Complex Temp[2][2];
39. Temp[0][0]=Mr[0][0]*M[i][0][0]
    +Mr[0][1]*M[i][1][0];
40. Temp[0][1]=Mr[0][0]*M[i][0][1]+
    Mr[0][1]*M[i][1][1];
41. Temp[1][0]=Mr[1][0]*M[i][0][0]+
    Mr[1][1]*M[i][1][0];
42. Temp[1][1]=Mr[1][0]*M[i][0][1]+
    Mr[1][1]*M[i][1][1];
43. Mr[0][0]=Temp[0][0];
44. Mr[0][1]=Temp[0][1];
45. Mr[1][0]=Temp[1][0];
46. Mr[1][1]=Temp[1][1];}
47. r = ((Mr[0][0]+Mr[0][1]*p[N-1])*p[0]-
    (Mr[1][0]+Mr[1][1]*p[N-1]))/
    ((Mr[0][0]+Mr[0][1]*p[N-1])
    *p[0]+(Mr[1][0]+Mr[1][1]*p[N-1]));

```

```

48. t=k/((Mr[0][0]+Mr[0][1]*p[N-1])
    *p[0]+(Mr[1][0]+Mr[1][1]*p[N-1]));
49. RR[m]=r.Mod()*r.Mod();
50. TT[m]=p[N-1]*t.Mod()*t.Mod()/p[0];
51. R[m]=r*A;
52. T[m]=t*A; }
53. ofstream foutRR("RR.txt"), foutTT("TT.txt"),
    foutRre("Rre.txt"), foutTre("Tre.txt"),
    foutRim("Rim.txt"),foutTim("Tim.txt");
54. for(int i=0; i<100;i++)
55. { foutRR<<RR[i]<<"\n";
56.   foutTT<<TT[i]<<"\n";
57.   foutRre<<R[i].Re<<"\n";
58.   foutTre<<T[i].Re<<"\n";
59.   foutRim<<R[i].Im<<"\n";
60.   foutTim<<T[i].Im<<"\n";}
61. foutRR.close();
62. foutTT.close();
63. foutRre.close();
64. foutTre.close();
65. foutRim.close();
66. foutTim.close();
67. txCreateWindow (maxX,maxY);
68. txLine (30,30,30,maxY-30);
69. txLine (30,maxY-30,maxX-30,maxY-30);
70. float mX,mY;
71. mX=(maxX-60)/90;
72. mY=(maxY-60);
73. for(int i=1;i<10;i++)
74. txLine (i*10*mX+30,maxY-35,i*10*mX+
    30,maxY-25);
75. txTextOut (10*mX+20,maxY-20, "10");
76. for(int i=1;i<11;i++)
77. txLine (25,maxY-(0.1*i*mY+30),35,maxY-
    (0.1*i*mY+30));
78. txTextOut (40,maxY-(0.1*mY+40), "0.1");
79. for (int i=0;i<99;i++)
80. { txSetColor (TX_YELLOW);
81.   txLine (i*mX+30,maxY-(RR[i]*mY+30),
    (i+1)*mX+30,maxY-(RR[i+1]*mY+30));
82.   txSetColor (TX_GREEN);
83.   txLine (i*mX+30,maxY-(TT[i]*mY+30),
    (i+1)*mX+30,maxY-(TT[i+1]*mY+30));}
84. return 0;}

```

На рисунке 2 показан частотный спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую структуру (Cu<sub>2</sub>O/Si/Ag<sub>2</sub>O/C) при разных углах падения  $\alpha$ . Толщина слоя: 100 Нм, 160 Нм, 80 Нм, 120 Нм. Длина волны падающего излучения составляет 640 Нм. Количество повторений структуры: 10. Входные данные программы:  $n[n]=\{1, 3.24, 3.42, 2.97, 2.38, 1\}$ ,  $l_0=640h[N-1]=\{0, 100, 160, 80, 120\}$ ,  $C = 10$ .

На рисунке 3 показан частотный спектр коэффициентов отражения и пропускания при прохождении через слоистую периодическую

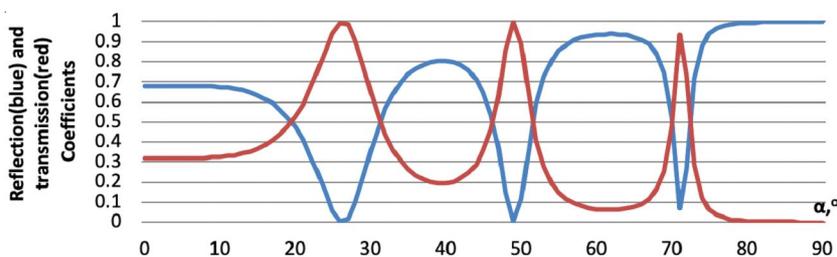


Рис. 2. Коэффициенты отражения энергии (синий) и пропускания (красный) при различных углах падения  $\alpha$  при прохождении через слоистую структуру Cu<sub>2</sub>O/Si/Ag<sub>2</sub>O/C

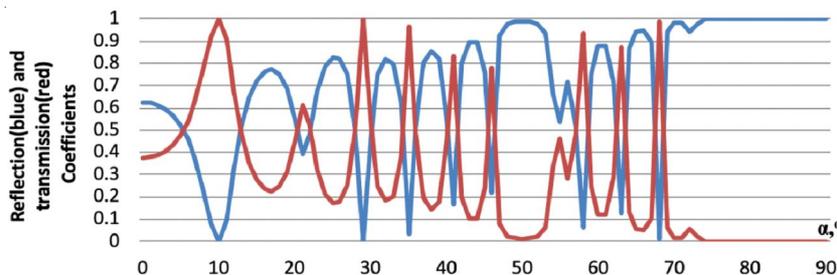


Рис. 3. Коэффициенты отражения энергии (синий) и пропускания (красный) при различных углах падения  $\alpha$  при прохождении через слоистую структуру Cu<sub>2</sub>O/Si/Ag<sub>2</sub>O/C с дефектным слоем

структуру ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Si}/\text{Ag}_2\text{O}/\text{C}$ ) при разных углах падения  $\alpha$ . Толщина слоя: 100 Нм, 160 Нм, 80 Нм, 120 Нм. Длина волны падающего излучения составляет 640 Нм. Количество повторений структуры: 10. Дефект: толщина второго слоя в пятом периоде составляет 800 Нм. Входные данные программы:  $n[n]=\{1,3,24,3,42,2,97,2,38,1\}$ ,  $l_0=640h[N-1]=\{0,100,160,80,120\}$ ,  $C=10$ ,  $\sigma=5$ ,  $q=2$ ,  $d=5$ .

Вопрос анализа дефектов в периодических структурах важен, так как нарушение периодичности в них может привести к рассеянию энергии электромагнитного поля на дефектах. Для описания последнего была создана программа, получившая официальную регистрацию в реестре компьютерных программ [9]. Например, были рассчитаны энергетические коэффициенты отражения и пропускания для слоистой периодической структуры с дефектом и без него из следующих компонентов: слой оксида меди  $\text{Cu}_2\text{O}$  толщиной 100 Нм, слой кремния Si толщиной 160 нм, слой оксида серебра  $\text{Ag}_2\text{O}$  толщиной 80 Нм, слой алмаза толщиной 120 Нм. Программа используется для анализа частотного спектра волны, проходящей через исследуемую слоистую периодическую структуру.

На основе этого можно сделать вывод, что спектральная зависимость этих коэффициентов имеет ярко выраженную интерференционную картину. Из этого рисунка можно извлечь информацию о структуре слоистой периодической среды.

Результаты, полученные с помощью разработанной компьютерной программы, могут быть использованы для спектрального анализа при исследовании слоистых периодических сред с различными конфигурациями структуры и наличием дефектов, а также при анализе дефектов в одномерных фотонных кристаллах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белотелов, В. И. Фотонные кристаллы и другие материалы / В. И. Белотелов, А. К. Звездин. – М. : Бюро Квантум, 2006. – 144 с.
2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М. : Наука, 1973. – 720 с.
3. Горелик, В. С. Оптические и диэлектрические свойства наноструктурированных фотонных кристаллов, заполненных сегнетоэлектриками и

металлами / В. С. Горелик // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, № 7. – С. 1252–1258.

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

5. 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.

6. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения: учебное пособие / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов, А. М. Кротов. – М., 2007. – 125 с.

7. Структура и оптические свойства слоистых нанокомпозитов  $\text{ZnSe}/\text{SiO}_2$  / П. Н. Крылов, Р. М. Закирова, В. Ф. Кобзиев, Н. В. Костенков, И. В. Федотова, Р. Р. Хамидуллин, А. А. Дедюхин // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 7. – С. 69–73.

8. 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, № 7. – С. 1230–1236.

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

10. Хоружий, Д. Н. Усовершенствованные методики интерференционной лазерной термометрии / Д. Н. Хоружий, В. В. Яцышен // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2009. – Т. 12, № 3. – С. 38–42.

11. 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.

12. Яцышен, В. В. Разработка ультразвуковой измерительной системы для диагностики дефектов зоны сплавления в слоистых материалах / В. В. Яцышен, М. В. Слюсарев // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2012. – № 6. – С. 16–20.

### REFERENCES

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

2. Born M., Wolf E. *Osnovy optiki* [Fundamentals of Optics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 720 p.

3. Gorelik V.S. Opticheskie i dielektricheskie svoystva nanostrukturirovannykh fotonnykh kristallov, zapolnennykh segnetoelektrikhami i metallami [Optical and Dielectric Properties of Nanostructured Photonic Crystals Filled with Ferroelectrics and Metals]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2009, vol. 51, no. 7, pp. 1252-1258.

4. 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.

5. 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>.

6. Baloyan B.M., Kolmakov A.G., Alymov M.I., Krotov A.M. *Nanomaterialy. Klassifikatsiya, osobennosti svojstv, primeneniye i tekhnologii polucheniya: uchebnoye posobie* [Nanomaterials. Classification, Property Features, Application, and Acquisition Technologies. Textbook]. Moscow, 2007. 125 p.

7. Krylov P.N., Zakirova R.M., Kobziev V.F., Kostenkov N.V., Fedotova I.V., Khamidullin R.R., Dedyukhin A.A. Strukhtura i opticheskie svoystva sloistyh nanokompozitov ZnSe/SiO<sub>2</sub> [Structure and Optical Properties of Layered Nanocomposites ZnSe/SiO<sub>2</sub>]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2016, vol. 86, no. 7, pp. 69-73.

8. Samusev K.B., Yushin G.N., Rybin M.V., Limonov M.F. Strukturnye parametry sinteticheskikh opalov: statisticheskij analiz dannykh elektronnoj

mikroskopii [Structural Parameters of Synthetic Opals: Statistical Analysis of Electron Microscopy Data]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State], 2008, vol. 50, no. 7, pp. 1230-1236.

9. Verevkina K.Yu. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii dlya EVM №2019614152. Programma dlya rascheta koefitsientov 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.

10. Khoruziy D.N., Yatsyshen V.V. Uovershenstvovannyye metodiki interferencionnoj lazernoy termometrii [Improved Techniques for Interference Laser Thermometry]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Wave Process Physics and Radio Engineering Systems], 2009, vol. 12, no. 3, pp. 38-42.

11. 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. Textbook]. Novosibirsk, Izd-vo SORAN, 2005. 209 p.

12. Yatsyshen V.V., Slusarev M.V. Razrabotka ultrazvukovoy izmeritelnoy sistemy dlya diagnostiki defektov zony splavleniya v sloistykh materialakh [Creating the Ultrasonic Measuring System for the Defect Diagnostic in the Alloying Zone of Layered Metal Samples]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovacionnaya dejatel'nost'* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and Innovations], 2012, no. 6, pp. 16-20.

## OPTICAL DIAGNOSTICS OF DEFECTS IN LAMINATED PERIODIC NANOSTRUCTURES

**Ksenia Yu. Verevkina**

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

**Ilya Yu. Verevkin**

Postgraduate Student, Department of Mathematical Analysis and Function Theory,  
Volgograd State University  
MMa-191\_417795@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Valeriy V. Yatsyshen**

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

**Abstract.** The purpose of this work is to study the features of the properties of a plane wave incident on a layered and periodic medium with an embedded defective layer. The relevance of the study of photonic crystals is due to the fact that this area of modern materials science is widely developing in the world of science. A confirmation of the large growth in development is the specificity of the versatile application and implementation of photonic crystals. For example, it becomes possible to create digital computing devices based on photonics. The possibility of creating new types of lasers with the lowest lasing threshold, high-efficiency LEDs, optical switches, and light guides is also not ruled out. The uniqueness of photonic crystals lies in their structure, the properties of which have a periodic change in the refractive index. These crystals, due to their peculiarity, do not transmit light with a wavelength comparable to the time of the crystal structure, since they remain transparent for a wide range of electrical radiation. Formulas for the energy reflection and transmission coefficients for layered, periodic media are derived and calculated. A basic component of a computer program for calculating the reflection and transmission coefficients of layered nanostructures has been developed. An analysis was made of an interstitial layer, in this case a defect, in a periodic layered structure such as a photonic crystal.

**Key words:** layered media, plane wave, reflection coefficient, transmission coefficient, nanostructures, defect.