

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 623.4

ОПТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОСФЕР

О. А. Голованов, В. Я. Савицкий, О. В. Филиппов

Введение

В настоящее время за рубежом интенсивно ведется разработка тактического лазерного оружия (ТЛО) для вывода из строя оптических и оптико-электронных приборов различного функционального назначения, а также для поражения органов зрения операторов и наводчиков боевых машин. Наиболее вероятное поражение органов зрения лазерным излучением возможно на длинах волн $\lambda = 1,06$ мкм ($f = 283$ ТГц) и $\lambda = 0,53$ мкм ($f = 566$ ТГц). Одно из направлений защиты от ТЛО – использование оптических фильтров частотно-заградительного типа, которые не пропускают (отражают) электромагнитную энергию в узкой полосе указанных частот. Перспективным направлением решения этой задачи является использование в оптических фильтрах фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния [1].

Технология изготовления фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния в настоящее время достаточно отработана [1]. Полосы непропускания электромагнитной энергии фотонными кристаллами зависят от периода решетки опаловой матрицы и от размера диэлектрических наносфер, а глубина запрещенной зоны – от толщины фотонного кристалла и совершенства его структуры [2]. Для того, чтобы изготовить оптический фильтр с требуемыми свойствами, необходимо провести математическое моделирование прохождения лазерного излучения через фотонный кристалл на электродинамическом уровне строгости.

1. Построение математической модели

Рассмотрим дифракцию плоской однородной электромагнитной волны с амплитудой c_1^+ и частотой f на фотонном кристалле в виде плоского диска радиуса D и толщиной d при угле падения излучения 90° (рис. 1). В результате дифракции электромагнитной волны на фотонном кристалле появляются отраженная волна с амплитудой c_1^- и прошедшая волна с амплитудой c_2^- . Прохождение электромагнитной волны через фотонный кристалл на различных частотах характеризуется коэффициентом прохождения

$$k_{\text{пр}} = \frac{|c_2^-|}{|c_1^+|}. \quad (1)$$

Коэффициент прохождения принимает значения от $k_{\text{пр}} = 0$ (полное отражение от фотонного кристалла – запрещенная фотонная зона) до $k_{\text{пр}} = 1$ (полное прохождение через фотонный кристалл – зона пропускания).

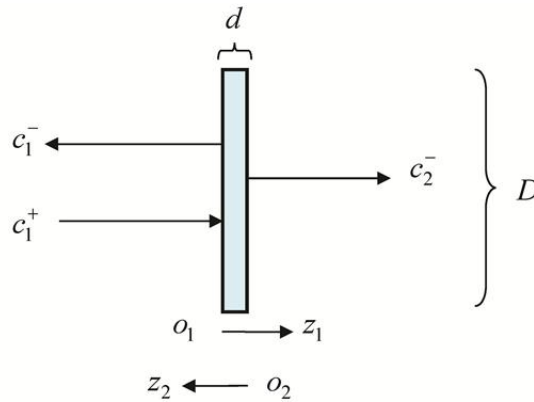


Рис. 1. Дифракция электромагнитной волны на фотонном кристалле: c_1^+ – амплитуда падающей волны, c_1^- – амплитуда отраженной волны, c_2^- – амплитуда прошедшей волны; $o_1 z_1, o_2 z_2$ – локальные системы координат

Математическую модель фотонного кристалла на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния будем строить с помощью декомпозиционного подхода [3]. Область фотонного кристалла на основе опаловой матрицы расчленим условными границами на подобласти – автономные блоки в виде однотипных прямоугольных параллелепипедов (рис. 2) с диэлектрическими наносферами и каналами Флоке на гранях [4].

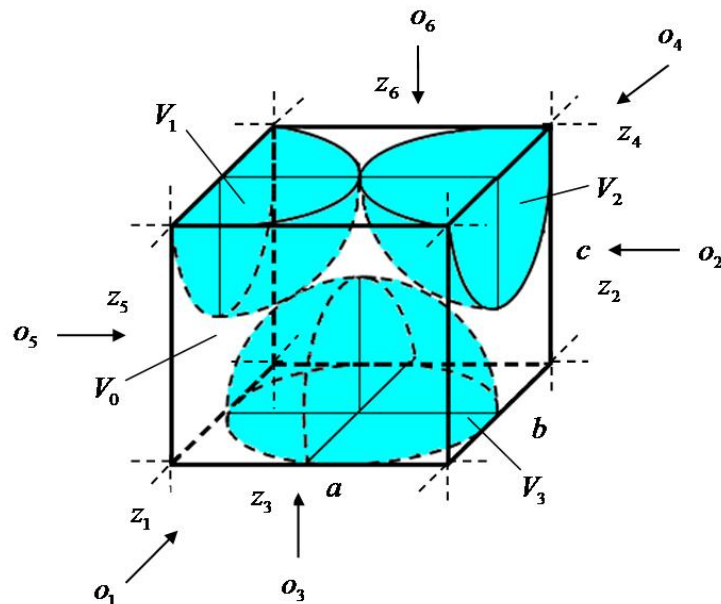


Рис. 2. Автономный блок в виде прямоугольного параллелепипеда с виртуальными каналами Флоке на гранях: V_0 – основная область; $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ – области диэлектрических наносфер; $V_0 - V$ – межсферическое пространство; $o_\alpha z_\alpha$ ($\alpha = 1, 2, \dots, 6$) – локальные системы координат для входных сечений S_α (граней); a, b, c – геометрические размеры параллелепипеда

Дескриптор (в линейном приближении – это матрица рассеяния \mathbf{R} [5]) автономного блока с каналами Флоке определяем в результате решения краевой задачи дифракции для уравнений

Максвелла с электродинамическими граничными условиями. Краевая задача электродинамики для автономного блока (см. рис. 2), содержащего диэлектрические наносферы, и каналами Флоке на гранях формулируется следующим образом.

Электромагнитное поле в области V (диэлектрические наносферы) автономного блока должно удовлетворять уравнениям Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_v \vec{E}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -i\omega \mu_0 \mu_v \vec{H}, \end{cases} \quad (1)$$

где ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ε_v, μ_v – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости наносфер.

На гранях автономного блока (входные сечения S_α) электромагнитное поле удовлетворяет условиям неасимптотического излучения [6]:

$$\begin{aligned} a_{k(\alpha)} + b_{k(\alpha)} &= \int_{S_\alpha} (\vec{E}_\alpha \times \vec{h}_{k(\alpha)}^*) \cdot d\vec{S}_\alpha + \int_{S_\alpha} (\vec{e}_{k(\alpha)} \times \vec{H}_\alpha^*) \cdot d\vec{S}_\alpha, \\ k &= 1, 2, \dots, \alpha = 1, 2, \dots, 6, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\vec{e}_{k(\alpha)}, \vec{h}_{k(\alpha)}$ – электрическая и магнитная составляющие компонентов собственных волн каналов Флоке; k – номер моды собственной волны; α – номер грани параллелепипеда; $a_{k(\alpha)}, b_{k(\alpha)}$ – коэффициенты рядов Фурье

$$\vec{E}_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} a_{k(\alpha)} \vec{e}_{k(\alpha)}, \quad \vec{H}_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} b_{k(\alpha)} \vec{h}_{k(\alpha)} \quad (4)$$

представления электрического и магнитного полей на гранях параллелепипеда. Для решения этой краевой задачи применим проекционный метод [6]. В качестве базисных функций $\{\vec{E}_k\}, \{\vec{H}_k\}$ используем системы собственных функций прямоугольного резонатора с однородно-периодическими граничными условиями на гранях резонатора. Собственные частоты ω_k и собственные функции $\{\vec{E}_k\}, \{\vec{H}_k\}$ резонатора определяются из решения следующей краевой задачи для уравнений Максвелла:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_k &= i\omega_k \varepsilon_0 \varepsilon_v \vec{E}_k; \\ \operatorname{rot} \vec{E}_k &= -i\omega_k \mu_0 \mu_v \vec{H}_k, \end{aligned} \right\} \text{ в области } V_0, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_k(S_1) &= \vec{E}_k(S_4), \quad \vec{H}_k(S_1) = \vec{H}_k(S_4); \\ \vec{E}_k(S_2) &= \vec{E}_k(S_5), \quad \vec{H}_k(S_2) = \vec{H}_k(S_5); \\ \vec{E}_k(S_3) &= \vec{E}_k(S_6), \quad \vec{H}_k(S_3) = \vec{H}_k(S_6). \end{aligned} \right\} \text{ на гранях,}$$

где ε_v, μ_v – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды диэлектрических наносфер. Геометрические размеры прямоугольного резонатора (область V_0) совпадают с геометрическими размерами автономного блока (см. рис. 2). Применяя метод Галеркина, из проекционной формы и условий неасимптотического излучения (3) получаем матрицу рассеяния автономного блока \mathbf{R} .

Задачу дифракции на фотонном кристалле решаем с помощью декомпозиционного вычислительного алгоритма на основе метода автономных блоков с каналами Флоке [4], модифицированного с целью учета диэлектрических наносфер. В декомпозиционной схеме моделирования фотонного кристалла все автономные блоки являются однотипными, что позволяет использовать

вычислительный алгоритм многоуровневой рекомпозиции блоков (рис. 3), который существенно сокращает время расчетов на компьютере.

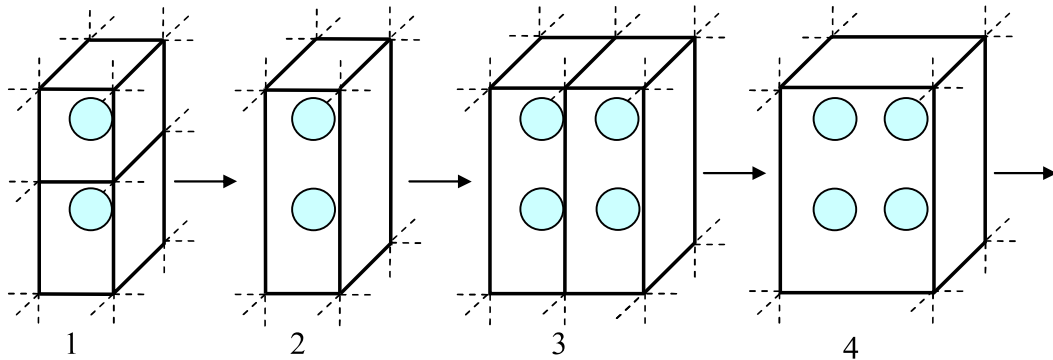


Рис. 3. Многоуровневая рекомпозиция автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами: 1–4 – фрагменты рекомпозиции

Многоуровневая рекомпозиция автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами заключается в следующем. Два однотипных автономных блока объединяются в один блок в виде прямоугольного параллелепипеда (фрагмент 1). Два виртуальных канала Флоке на гранях этого автономного блока преобразуются в один виртуальный канал. В результате преобразования получаем автономный блок с шестью виртуальными каналами на гранях (фрагмент 2), затем процесс повторяется (фрагменты 3, 4 на рис. 3.).

2. Теоретическое исследование оптических фильтров

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл в зависимости от радиуса наносфер r при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$ (различного числа слоев N) показаны на рис. 4. Как следует из результатов математического моделирования, положение запрещенной фотонной зоны зависит от радиуса наносфер r (периода решетки опаловой матрицы), и непрохождение лазерного излучения через фотонный кристалл вблизи частоты $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1,06$ мкм) наблюдается при радиусах наносфер от 128 до 142 нм. Чем больше толщина фотонного кристалла (число слоев N), тем меньше коэффициент прохождения, а следовательно, и лучше защита от лазерного излучения. При этом разброс размеров наносфер (радиусов r) не должен превышать 5 %.

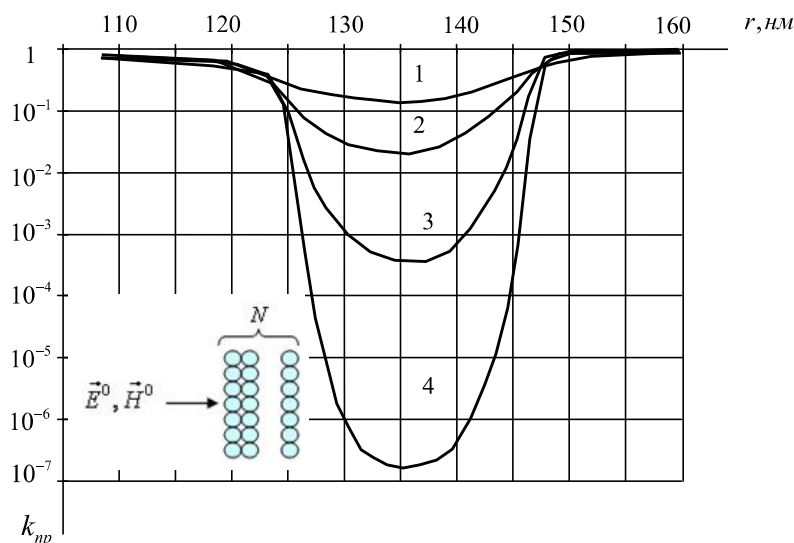


Рис. 4. Коэффициент прохождения оптического излучения через 3-D фотонно-кристаллическую структуру в зависимости от радиуса наносфер r при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$: $f = 283$ ТГц

($\lambda = 1,06$ мк); наносфера SiO_2 ($\epsilon_1 = 4,6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$); межсферическое заполнение ($\epsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$);
 $D = 10$ мм; кривая 1 – $N = 8$, 2 – $N = 16$, 3 – $N = 32$, 4 – $N = 64$

Рассчитанные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл от частоты при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$ (различном числе слоев N) показаны на рис. 5, а–г.

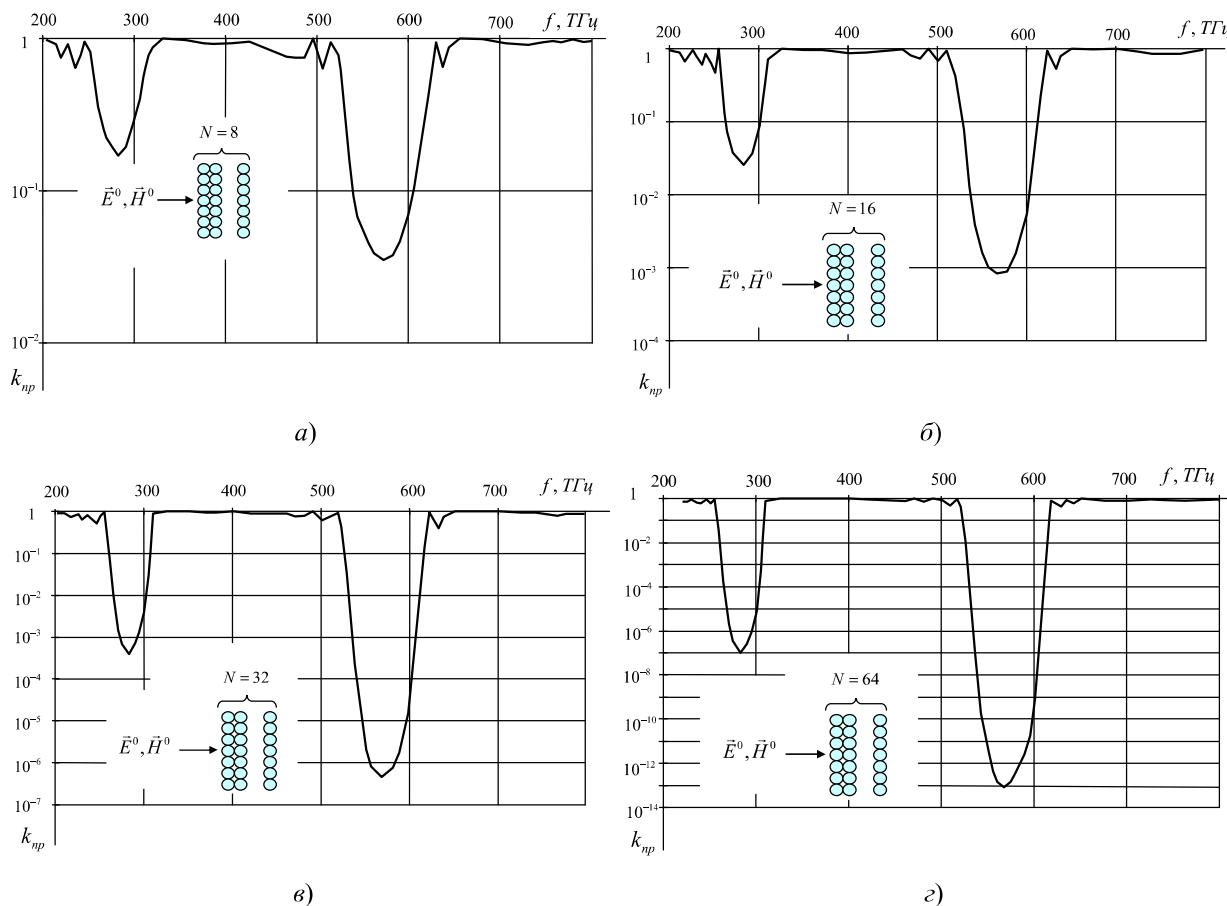


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через фотонный кристалл при различной толщине $d = 2rN$ фотонного кристалла:
 а – $N = 8$; б – $N = 16$; в – $N = 32$; г – $N = 64$; наносфера SiO_2 ($\epsilon_1 = 4,6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$), $r = 135$ нм;
 межсферическое заполнение ($\epsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$); $D = 10$ мм

Как следует из результатов математического расчета, приведенных на рис. 5, а–г, оптический фильтр на основе фотонного кристалла имеет запрещенные фотонные зоны (полосы непропускания для лазерного излучения) на частотах $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1,06$ мкм) и $f = 566$ ТГц ($\lambda = 0,53$ мкм), в остальной части частотного спектра практически пропускает электромагнитные волны.

Заключение

Степень защиты от лазерного излучения с помощью оптического фильтра существенно зависит от толщины фотонного кристалла – чем больше толщина, тем надежнее защита. Однако необходимо отметить, что изготовление фотонных кристаллов толщиной $d = 2rN$ с числом слоев $N = 64$ и выше сопряжено со значительными технологическими трудностями. Время изготовления таких кристаллов – несколько недель, при этом структура решеток может иметь значительные дефекты. Оптический фильтр на основе опаловой матрицы с гексагональной решеткой из наносфер SiO_2 диаметром 270 мкм (разброс по диаметру не более 5 %) с толщиной $N = 32$ надежно

защищает зрение операторов оптических приборов от тактического лазерного оружия частот $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1,06$ мкм) и $f = 566$ ТГц ($\lambda = 0,53$ мкм). Поток световой энергии, оцениваемый по зрительному ощущению, от объекта наблюдения снижается в два раза, при этом наблюдатель практически не видит зеленый цвет и частично желтый.

Список литературы

1. Исследование опаловых матриц и нанокomпозитов на их основе / М. И. Самойлович, А. Ф. Белянин, С. М. Клещева, В. Д. Житковский, А. В. Гурьянов // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники) : моногр. – М. : ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2004. – Ч. 3. – С. 257–363.
2. 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.
3. Горячев, Н. В. Индикатор обрыва предохранителя как элемент первичной диагностики отказов РЭА / Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2010. – Т. 2. – С. 78–79.
4. Никольский, В. В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1983. – 297 с.
5. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
6. Голованов О. А. Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О. А. Голованов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 12. – С. 1423–1430.
7. Рындин, Д. А. Применение индикаторных проникающих веществ для повышения эффективности работы автоматических систем оптического контроля печатных плат / Д. А. Рындин, А. В. Лысенко, Е. А. Сидорова // Труды международного симпозиума Надежность и качество, 2013. – Т. 2. – С. 84–86.
8. Голованов, О. А. Построение дескрипторов нелинейных универсальных автономных блоков с каналами Флоке итерационным методом на основе проекционной модели / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. А. Туманов // Известия вузов. Поволжский регион. Серия «Естественные науки». – 2006. – № 5 (26). – С. 157–166.
9. Никольский, В. В. Проекционные методы в электродинамике / В. В. Никольский // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. – М. : Высшая школа, 1977. – С. 4–23.

Савицкий Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 11,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: W.savis@gmail.com.

Голованов Олег Александрович

доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра общеобразовательных дисциплин,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: golovanovol@mail.ru

Филиппов Олег Валерьевич

аспирант,
кафедра общеобразовательных дисциплин,
Пензенский артиллерийский инженерный институт
(440005, Россия, Пензенская обл., г. Пенза-5)
E-mail: Filippov_ov@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель оптического фильтра на основе опаловой матрицы из кубических упаковок диэлектрических наносфер двуокиси кремния. Математическая модель постро-

Savitskiy Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department № 11,
Penza artillery engineering institute
(440005, Penza-5, Penza region, Russia)

Golovanov Oleg Aleksandrovich

doctor of physical and mathematical sciences, professor,
sub-department of general subjects,
Penza artillery engineering institute
(440005, Penza-5, Penza region, Russia)

Filippov Oleg Valer'evich

postgraduate student,
sub-department of general subjects,
Penza artillery engineering institute
(440005, Penza-5, Penza region, Russia)

Abstract. The mathematical model of the optical filter on the basis of an opal matrix from cubic packings dielectric nanosphere is offered to dioxide of silicon. The mathematical model is constructed by means of inde-

ена с помощью автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами и виртуальными каналами Флоке. Получены результаты расчета коэффициента прохождения электромагнитного излучения через оптический фильтр от частоты при различной толщине фотонного кристалла. Установлены рациональные параметры опаловой матрицы для изготовления оптического фильтра.

Ключевые слова: тактическое лазерное оружие, защитный фильтр, опаловая матрица, математическая модель, автономный блок, матрица рассеяния, спектральные характеристики.

pendent blocks as rectangular parallelepipeds with dielectric nanospheres and virtual channels the Flock. Results of calculation of factor of passage of electromagnetic radiation through the optical filter from frequency are received at various thickness of a photon crystal. Rational parameters of an opal matrix for manufacturing the optical filter are established.

Key words: the tactical laser weapon, the protective filter, an opal matrix, mathematical model, the independent block, a matrix of dispersion, spectral characteristics.

УДК 623.4

Голованов, О. А.

Оптические фильтры на основе опаловых матриц из диэлектрических наносфер / О. А. Голованов, В. Я. Савицкий, О. В. Филиппов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 17–23.