

УДК 535.32

О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. С. Николенко, М. А. Чиркина

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗОН ПРОПУСКАНИЯ И ЗАПРЕЩЕННЫХ ЗОН В СПЕКТРЕ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Аннотация. Проведено математическое моделирование дифракции электромагнитной волны на 3D фотонно-кристаллической структуре декомпозиционным методом автономных блоков с каналами Флоке. Получены результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения оптического излучения через оптический фильтр – 3D фотонно-кристаллическую структуру на основе опаловой матрицы от частоты при различной толщине фотонного кристалла.

Ключевые слова: дифракция, коэффициент прохождения, фотонно-кристаллическая структура, опаловая матрица, оптический фильтр.

Abstract. The mathematical modeling of diffraction of electromagnetic wave on the 3D photonic crystal structure was done using the decomposition method on autonomous blocks with Floquet channels. The results of electrodynamic calculation of transmission coefficient of optical radiation through the 3D opal-based photonic crystal structure depending on the frequency for different thickness of photonic crystal.

Keywords: diffraction, transmission coefficient, photonic crystal structure, opal-based, optical radiation.

Введение

С 1993 г. в США фирмой «Мартин Мариетта» ведется разработка тактического лазерного оружия по программе «Стингрей» для вывода из строя оптико-электронных приборов (лазерных дальномеров, приборов ночного видения и т.д.), а также для поражения органов зрения операторов оптических приборов (снайперов, наводчиков орудий и т.д.). Модульное тактическое лазерное оружие предназначено для размещения на башнях танков и БМП (в частности на БМП «Бредли»). Масса модуля – 50 кг, мощность излучения $E_{\text{изл}} = 20 \dots 25$ Дж, длина волны $\lambda = 1,06$ и $0,53$ мкм.

Принцип работы активных средств противодействия заключается в воздействии мощных световых вспышек (импульсов), в том числе и лазерного излучения, на органы зрения операторов, наблюдателей, а также на телевизионные камеры, приборы ночного видения инфракрасного диапазона с целью их временной дезориентации или засветки. Дезориентация зрения снайперов, наводчиков под воздействием мерцающих вспышек проявляется в потере восприятия глубины пространства и, как следствие, неточности наведения на цель.

В системе *Advanced Optical Counter-Measures*, предназначенной для подавления оптических систем наведения и целеуказания средств борьбы с воздушными целями, имеются устройства обнаружения вспышек зенитных орудий и два лазерных устройства, которые смонтированы в подвесном контейнере самолета. Один лазер определяет направление и дальность до цели, а другой излучает мощные импульсы на волне $0,53$ мкм (в зеленой области видимого спектра, т.е. участке спектра наибольшей чувствительности глаза человека) в направлении цели.

Наиболее вероятное поражение зрения операторов оптических систем от лазерного оружия противника представляется возможным на длинах волн $\lambda = 1,06$ мкм ($f = 283$ ТГц) и $\lambda = 0,53$ мкм ($f = 566$ ТГц). Одно из направлений защиты от тактического лазерного оружия – это использование оптических фильтров частотно-заградительного типа, которые не пропускают (отражают) электромагнитную энергию в узкой полосе частот вблизи частот $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1,06$ мкм) и $f = 566$ ТГц ($\lambda = 0,53$ мкм). Перспективным направлением решения этой задачи является использование в оптических фильтрах фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния SiO_2 [1].

Технология изготовления фотонных кристаллов на основе опаловой матрицы из наносфер двуокиси кремния SiO_2 в настоящее время достаточно отработана [1]. Оптические свойства фотонных кристаллов и в том числе положения запрещенной фотонной зоны (полосы непропускания электромагнитной энергии) зависят от периода решетки опаловой матрицы и, следовательно, от размера наносфер SiO_2 , а глубина запрещенной зоны – от совершенства структуры матрицы [2]. Для того чтобы изготовить оптический фильтр с требуемыми свойствами, необходимо провести математическое моделирование прохождения лазерного излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру на электродинамическом уровне строгости.

1. Декомпозиционный вычислительный алгоритм решения задачи дифракции

Рассмотрим дифракцию плоской однородной электромагнитной волны с амплитудой c_1^+ и частотой f на 3D фотонно-кристаллической структуре в виде плоского диска радиуса D и толщиной d (при угле падения излучения 90°) (рис. 1).

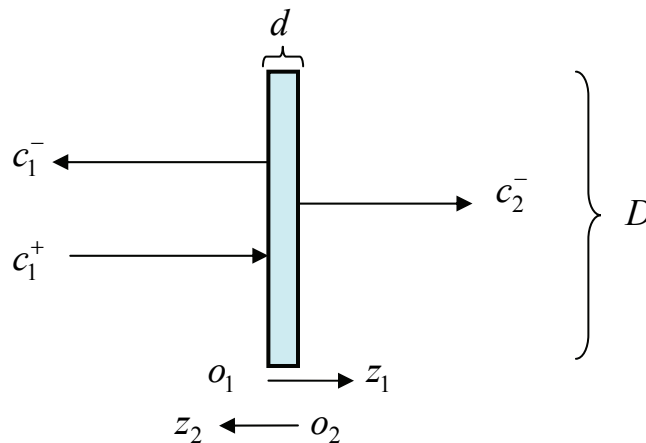


Рис. 1. Дифракция электромагнитной волны на 3D фотонно-кристаллической структуре (при нормальном падении): c_1^+ – амплитуда падающей волны; c_1^- – амплитуда отраженной волны; c_2^- – амплитуда прошедшей волны; $o_1 z_1, o_2 z_2$ – локальные системы координат

В результате дифракции электромагнитной волны на 3D фотонно-кристаллической структуре появляются отраженная волна с амплитудой c_1^- и прошедшая волна с амплитудой c_2^- .

Прохождение электромагнитной волны через фотонно-кристаллическую структуру на различных частотах характеризуется коэффициентом прохождения, который определяется

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

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).

Математическую модель волнового процесса дифракции электромагнитной волны на 3D фотонно-кристаллической структуре будем строить при помощи декомпозиционного подхода [3]. Область 3D фотонно-кристаллической структуры на основе опаловой матрицы (рис. 1,б) расчленим условными границами на подобласти – автономные блоки в виде однотипных прямоугольных параллелепипедов (рис. 2) с диэлектрическими наносферами и каналами Флоке на гранях [4].

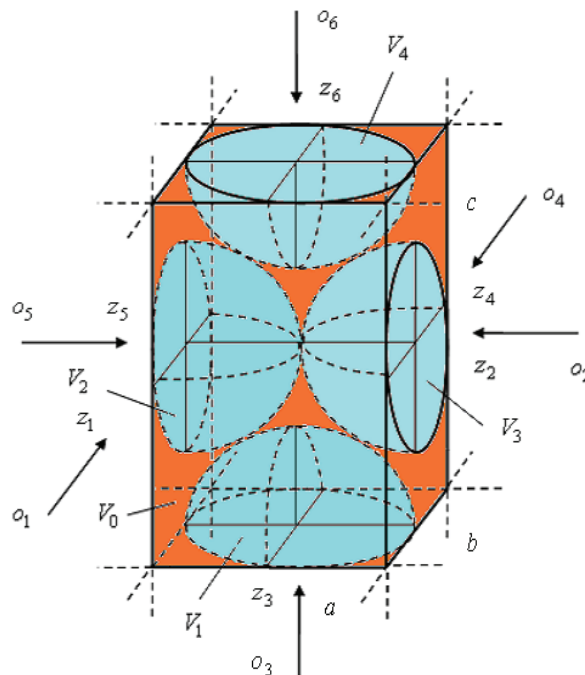


Рис. 2. Автономный блок в виде прямоугольного параллелепипеда с виртуальными каналами Флоке на гранях: V_0 – основная область; $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4$ – области диэлектрических наносфер; $V_0 - V$ – межсферическое пространство; $o_\alpha z_\alpha$ ($\alpha = 1, 2, \dots, 6$) – локальные 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 (рис. 2), содержащего диэлектрические наносферы, и с каналами Флоке формулируется следующим образом.

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

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = i \omega \epsilon_0 \epsilon_v \vec{E}, \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -i \omega \mu_0 \mu_v \vec{H}, \end{cases} \quad (2)$$

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]:

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

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:

$$\begin{aligned} &\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}_k &= i \omega_k \epsilon_0 \epsilon_v \vec{E}_k; \\ \operatorname{rot} \vec{E}_k &= -i \omega_k \mu_0 \mu_v \vec{H}_k, \end{aligned} \right\} \text{ в области } V_0, \quad (5) \\ &\left. \begin{aligned} \vec{E}_k(S_1) &= \vec{E}_k(S_4), \quad \vec{H}_k(S_1) = \vec{H}_k(S_4); \\ \vec{E}_k(S_2) &= \vec{E}_k(S_5), \quad \vec{H}_k(S_2) = \vec{H}_k(S_5); \\ \vec{E}_k(S_3) &= \vec{E}_k(S_6), \quad \vec{H}_k(S_3) = \vec{H}_k(S_6). \end{aligned} \right\} \text{ на гранях,} \end{aligned}$$

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 (рис. 2).

Применяя метод Галеркина, из проекционной формы и условий неасимптотического излучения (3) получаем матрицу рассеяния автономного блока $\mathbf{R}$.

Задачу дифракции на 3D фотонно-кристаллической структуре решаем с помощью декомпозиционного вычислительного алгоритма на основе метода автономных блоков с каналами Флоке [4], модифицированного с целью учета диэлектрическими наносферами.

В декомпозиционной схеме моделирования 3D фотонно-кристаллической структуры все автономные блоки являются однотипными, что позволяет использовать вычислительный алгоритм многоуровневой рекомпозиции блоков (рис. 3), который существенно сокращает время расчетов на компьютере.

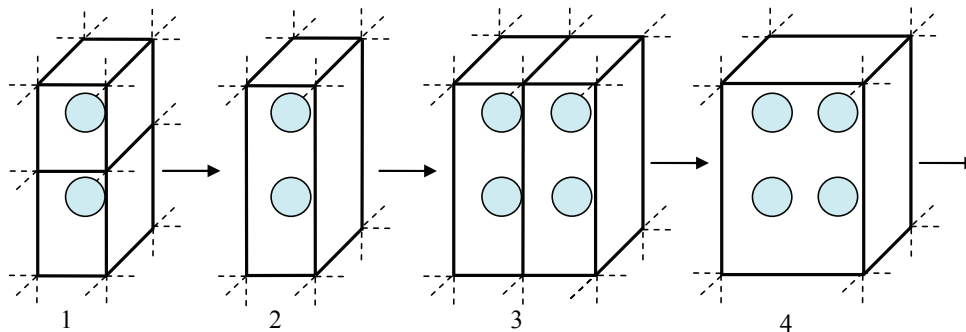


Рис. 3. Многоуровневая рекомпозиция автономных блоков в виде прямоугольных параллелепипедов с диэлектрическими наносферами: 1, 2, 3, 4 – фрагменты рекомпозиции

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. Результаты моделирования прохождения оптического излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру на основе опаловой матрицы

Результаты электродинамического расчета коэффициента прохождения оптического излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру 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 ре-

шетки 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 %.

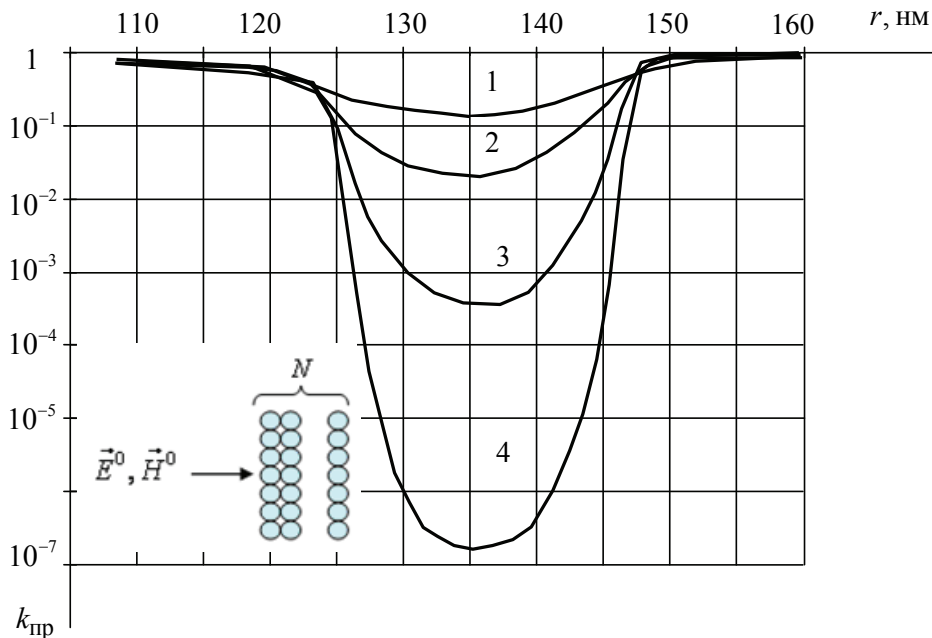


Рис. 4. Коэффициент прохождения оптического излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру в зависимости от радиуса наносфер r при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$: $f = 283$ ТГц ($\lambda = 1,06$ мкм); наносфера SiO_2 ($\epsilon_1 = 4,6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$); межсферическое заполнение $\epsilon_2 = 1$, $\mu_2 = 1$; $D = 10$ мм; кривые 1 – $N = 8$; 2 – $N = 16$; 3 – $N = 32$; 4 – $N = 64$

Рассчитанные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру от частоты при различной толщине фотонного кристалла $d = 2rN$ (различном числе слоев N) показаны на рис. 5.

Как следует из результатов электродинамического расчета, приведенных на рис. 5, 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.

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.

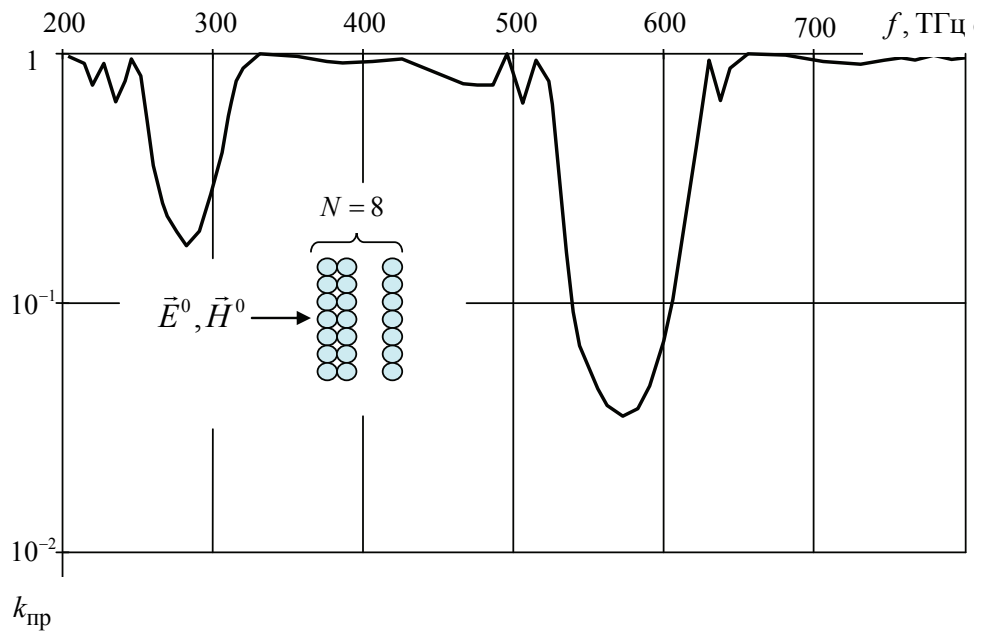
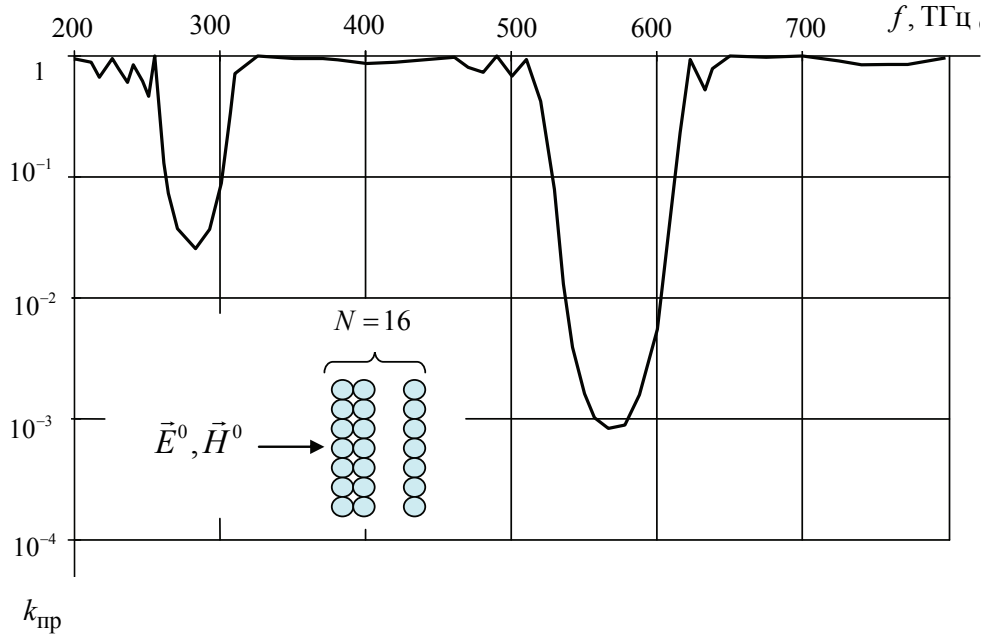
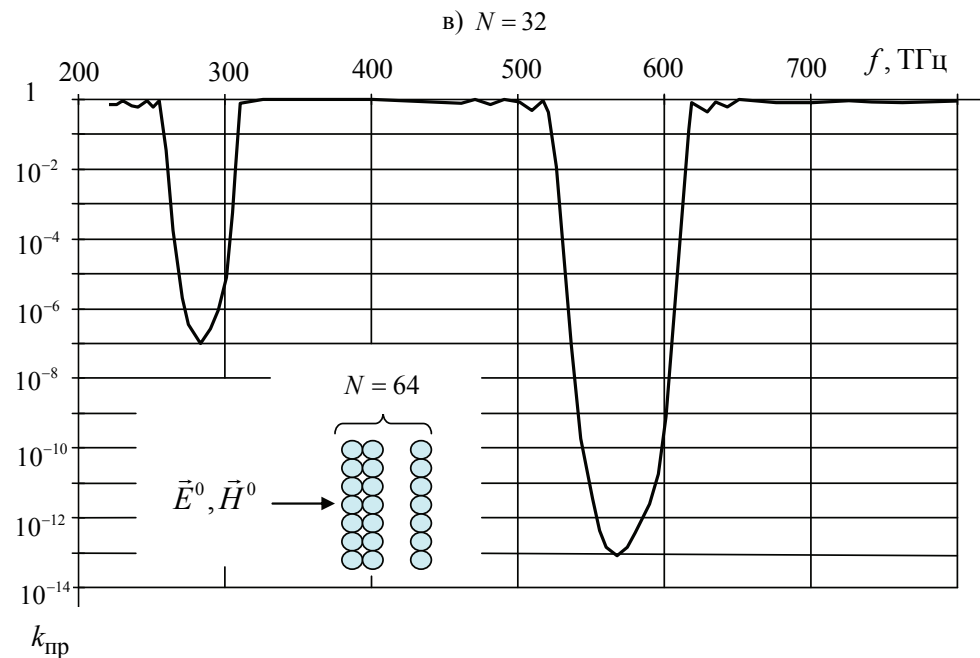
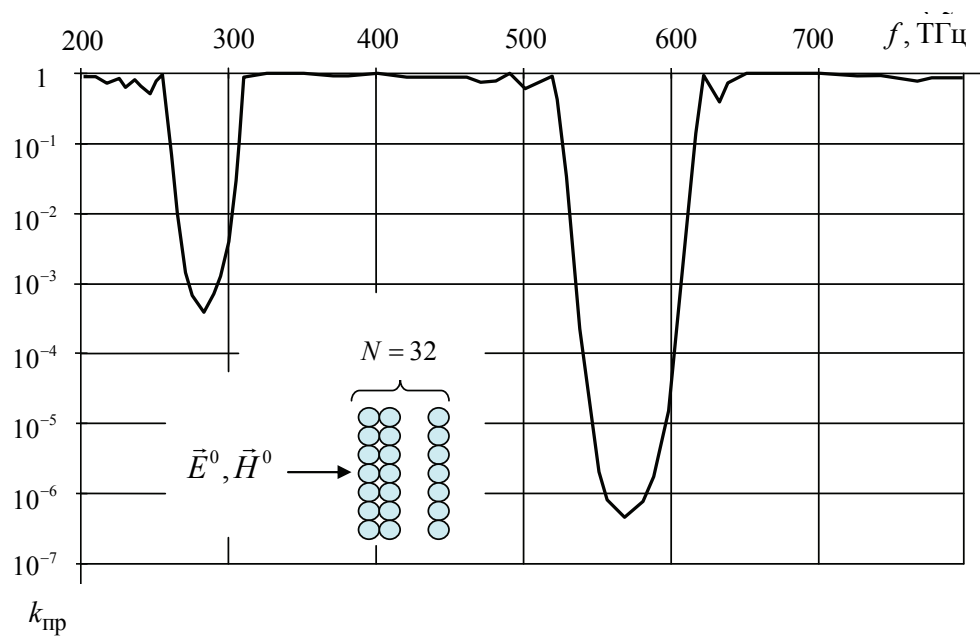
а) $N=8$ б) $N=16$

Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через 3D фотонно-кристаллическую структуру при различной толщине $d = 2rN$ фотонного кристалла; наносфера SiO_2 ($\epsilon_1 = 4,6 - i5 \cdot 10^{-4}$, $\mu_1 = 1$), $r = 135$ нм; межсферическое заполнение ($\epsilon_2 = 1$, $\mu_1 = 1$); $D = 10$ мм (см. также с. 138)



г) $N = 64$

Рис. 5. Окончание

Оптический фильтр на фотонном кристалле на основе опаловой матрицы с гексагональной решеткой из наносфер SiO_2 диаметром 270 нм (разброс по диаметру не более 5 %) с толщиной $N = 32$ более 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 целей снижается

в два раза, при этом оператор практически не видит зеленый цвет и частично желтый. Ведение боевых действий с применением в оптических приборах фотонных кристаллов, очевидно, требует дополнительной подготовки оператора (снайпера, наводчика орудия и т.д.).

Список литературы

1. **Самойлович, М. И.** Исследование опаловых матриц и нанокompозитов 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) : коллективная монография. – 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. **Никольский, В. В.** Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1983. – 297 с.
4. **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.
5. **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 высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006. – № 5 (26). – С. 157–166. – (Естественные науки).
6. **Никольский, В. В.** Проекционные методы в электродинамике / В. В. Никольский // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. – М. : Высшая школа, 1977. – С. 4–23.

Голованов Олег Александрович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
математики и начертательной геометрии,
Пензенский артиллерийский
инженерный институт им. Н. Н. Воронова

E-mail: golovanovol@mail.ru

Golovanov Oleg Alexandrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of sub-department
of mathematics and descriptive geometry,
Penza Artillery Engineering
Institute named after N. N. Voronov

Макеева Галина Степановна

доктор физико-математических наук,
профессор, кафедра радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет,
действительный член Академии
инженерных наук им. А. М. Прохорова

E-mail: radiotech@pnzgu.ru

Makeeva Galina Stepanovna

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, sub-department of radio
engineering and radio electronic systems,
Penza State University, full member
of the Academy of Engineering Sciences
named after A. M. Prokhorov

Николенко Антон Станиславович

преподаватель, Военный учебно-
научный центр Сухопутных Войск
«Общевойсковая академия ВС РФ»
(г. Пенза)

E-mail: nikolants@mail.ru

Nikolenko Anton Stanislavovich

Lecturer, Combined Arms Academy
of the Armed Forces of the Russian
Federation (Penza)

Чиркина Марина Александровна

старший преподаватель, кафедра
прикладной математики и информатики,
Пензенский государственный
архитектурно-строительный университет

E-mail: chm-77@mail.ru

Chirkina Marina Alexandrovna

Senior lecturer, sub-department
of applied mathematics and informatics,
Penza State University of architecture
and construction

УДК 535.32

Голованов, О. А.

Электродинамический анализ зон пропускания и запрещенных зон в спектре оптического фильтра на основе фотонного кристалла /
О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. С. Николенко, М. А. Чиркина // Известия
высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические
науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 131–140.