

РАДИОФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ПЛАЗМЫ

УДК 548:537.874.35

УГЛОВЫЕ ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОМЕРНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

К. А. Вытовтов, А. Д. Архипов

*Днепропетровский национальный университет им. Олесь Гончара
72, пр. Гагарина, Днепропетровск, 49010, Украина
E-mail: vytovtov_konstan@mail.ru*

Рассматривается одномерный анизотропный фотонный кристалл с произвольным направлением оси анизотропии. Исследована зависимость коэффициентов отражения от угла падения плоской гармонической волны на плоскопараллельную пластину. Найденны параметры кристалла, при которых минимум отражения наблюдается в окрестности нулевого угла падения. Получены резонансные характеристики отражения в плоскости углов падения. Предложено их применение в качестве формирователей диаграмм направленности оптических излучателей. Ил. 2. Библиогр.: 26 назв.

Ключевые слова: фотонный кристалл, диаграмма направленности, коэффициент отражения, угол падения.

Исследования в области фотонных кристаллов широко представлены в современной научной литературе [1–14]. В зависимости от геометрии задачи различают одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы. Одномерные кристаллы [5, 9, 13, 14] представляют собой наиболее простой случай и, по сути, являются слоистыми периодическими или квазипериодическими структурами. И хотя уже слоистые анизотропные структуры нельзя считать одномерными, поскольку их электромагнитные свойства зависят как от направления наслоения z , так и от направления в плоскости, параллельной границам раздела слоев, в литературе их все же называют одномерными анизотропными фотонными кристаллами [13, 14].

Несмотря на то что такие среды изучались не менее 150 лет [15–25], задача их исследования на сегодняшний день остается не полностью законченной. В частности, исследование зависимости коэффициентов отражения анизотропных фотонных кристаллов от угла падения проводилось либо экспериментально, либо численными методами [2–4]. И хотя в литературе представлено достаточное количество строгих аналитических методов, позволяющих проводить такие расчеты, основное внимание, как правило, уделялось исследованию зависимости отражения и прохождения от оптической толщины слоя или частоты [13, 14, 18–21, 23], причем произвольное направление оси анизотропии практически не рассматривалось. На сегодняшний день существует ряд работ в этом направлении. Зависимость коэффициента отражения от угла падения для анизотропных фотонных кристаллов рассматривалась, например, в работе [6], где изучался полубесконечный двухмерный фотонный кристалл, авторами была получена матрица отражения, найдены области полного отра-

жения падающей волны при различных углах падения. Киральные среды под произвольным углом падения рассмотрены в работе [7], в частности, рассмотрены структуры с различным количеством слоев, для различных параметров сред найдены области полного отражения при падении волны под произвольными углами. Зависимости коэффициента отражения от углов также изучались в работе [8] для случая волновода на базе фотонных кристаллов, в ней представлены экспериментальные результаты исследований отражающей способности в рассматриваемых волноводах. Подобные зависимости также были рассмотрены в работе [22] для искусственной бианизотропной структуры, в ней найдены области полного отражения на частотных зависимостях коэффициента отражения для разных углов падения излучения. В работе [9] проведен анализ коэффициента отражения от пластин анизотропного материала и анизотропных фотонных кристаллов в зависимости от угла падения и угла наклона оси анизотропии, однако в работе не рассматривался эффект полного внутреннего отражения. Зависимость коэффициента отражения от угла падения для полимерной пленки, включающей анизотропный материал, изучалась в работе [10]. В ней получены и описаны зависимости от углов падения для разных параметров анизотропного материала. В работе [11] рассмотрен неполяризационный фильтр для произвольного угла падения и поляризационный фильтр для нормального падения на основе одноосных анизотропных слоев. Также получены зависимости узкополосных фильтров для нормального падения. Угловые и поляризационные свойства плоскопараллельной пластины фотонного кристалла, которые могут работать в качестве зеркала для волны, падающей в области около нормали, исследованы в работе [12].

В данной работе изучаются зависимости коэффициента отражения от угла падения волны и частоты. Особенностью представляемых исследований является учет влияния наклона оси анизотропии на свойства отраженной волны. Прежде всего, найдены резонансные характеристики коэффициента отражения в области углов падения, подобные амплитудно-частотной характеристике узкополосного фильтра в частотной области. Здесь также приведено физическое обоснование полученных зависимостей.

1. Постановка задачи. В работе изучается одномерный анизотропный фотонный кристалл с произвольно ориентированной осью анизотропии. Геометрия задачи изображена на рис. 1. Здесь α – угол падения волны; $x'y'z'$ – система координат, связанная с направлением оси анизотропии; xuz – система координат, связанная с нормалью к границам раздела слоев; $k_{\text{пад}}$, $k_{\text{отр}}$ – волновые векторы падающей и отраженной волн соответственно.

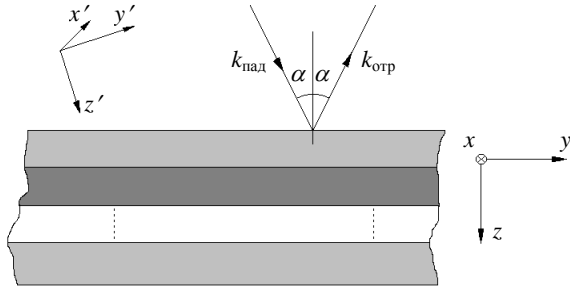


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи

Слои кристалла описываются материальными параметрами в гиротропной форме:

$$\varepsilon_{x'y'z'} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & j\varepsilon_{xy} & 0 \\ -j\varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}; \quad (1)$$

$$\mu_{x'y'z'} = \begin{vmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} & 0 \\ -j\mu_{xy} & \mu_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{vmatrix},$$

записанными в системе координат $x'y'z'$.

Нашей задачей является исследование зависимости коэффициента отражения от угла падения волны для случая наклонно ориентированной оси анизотропии. В результате получены различные характеристики отражения для разных параметров одномерных кристаллов. Здесь представлены и описаны только зависимости, имеющие, с нашей точки зрения, наибольший практический интерес.

2. Метод исследования. Для исследования одномерных анизотропных фотонных кристаллов в данной работе использованы хорошо известный метод матрицы преобразования, а также метод матриц отражения и прохождения. Для решения поставленной задачи прежде всего необходимо записать тензоры (1) в системе координат, связанной с нормалью к границам раздела сред с помощью преобразования Эйлера:

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & j\varepsilon_{xy} \cos \theta & -j\varepsilon_{xy} \sin \theta \\ -j\varepsilon_{xy} \cos \theta & \varepsilon_{zz} \sin^2 \theta + \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta & (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \cos \theta \sin \theta \\ j\varepsilon_{xy} \sin \theta & (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) \cos \theta \sin \theta & \varepsilon_{xx} \sin^2 \theta + \varepsilon_{zz} \cos^2 \theta \end{vmatrix}; \quad (2)$$

$$\mu = \begin{vmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} \cos \theta & -j\mu_{xy} \sin \theta \\ -j\mu_{xy} \cos \theta & \mu_{zz} \sin^2 \theta + \mu_{xx} \cos^2 \theta & (\mu_{zz} - \mu_{xx}) \cos \theta \sin \theta \\ j\mu_{xy} \sin \theta & (\mu_{zz} - \mu_{xx}) \cos \theta \sin \theta & \mu_{xx} \sin^2 \theta + \mu_{zz} \cos^2 \theta \end{vmatrix}.$$

Далее матрица преобразования находится непосредственно из уравнений Максвелла и связывает тангенциальные компоненты полей в начале и конце структуры. Метод является точным и аналитическим, он подробно описан в литературе [9, 13, 14, 18, 23–25]. Ранее были получены матрицы преобразования для случаев нормального направления оси анизотропии и нормального падения волны, произвольного направления оси анизотропии и нормального падения волны, нормального направления оси анизотропии и произвольного падения волны. Для общего случая анизотропной среды матрица записана,

например, в работе [18]. Таким образом, математический аппарат для исследования одномерных фотонных кристаллов разработан достаточно глубоко, основан на точных аналитических методах и без ограничений может быть использован в данной работе.

2×2 -матрица отражения, связывающая тангенциальные компоненты падающих и отраженных полей, записана в соответствии с методикой, изложенной в работе [19] непосредственно из 4×4 -матрицы преобразования. Результирующий коэффициент отражения по полю R находится из матрицы отражения как

$$R_{\parallel} = \left[\frac{1}{2} (R_{11}^2 + R_{22}^2 + R_{12}^2 + R_{21}^2) + \frac{1}{2} (R_{11}^2 + R_{21}^2 - R_{12}^2 - R_{22}^2) \cos 2\theta + (R_{11}^2 R_{12}^2 + R_{21}^2 R_{22}^2) \sin 2\theta \right]^{1/2} \cos \alpha \quad (3)$$

для случая, когда вектор электрического поля лежит в плоскости падения, и

$$R_{\perp} = \left[\frac{1}{2} (R_{11}^2 + R_{22}^2 + R_{12}^2 + R_{21}^2) + \frac{1}{2} (R_{11}^2 + R_{21}^2 - R_{12}^2 - R_{22}^2) \cos 2\theta + (R_{11}^2 R_{12}^2 + R_{21}^2 R_{22}^2) \sin 2\theta \right]^{1/2}, \quad (4)$$

когда вектор электрического поля перпендикулярен плоскости падения. Здесь R_{ij} – элементы матрицы отражения.

3. Результаты расчетов и обсуждение.

Прежде всего, результаты исследований показали, что изменением параметров слоев их количества и угла наклона оси анизотропии можно получить практически любую зависимость коэффициента отражения от угла падения волны.

Здесь мы рассмотрим один из наиболее интересных, с нашей точки зрения, анизотропный фотонный кристалл, формально описываемый как

$$L \times 8(H \times L). \quad (5)$$

Рассматриваемый фотонный кристалл включает два типа слоев – L и H . Параметры слоя L : $\epsilon_{xx} = 2,50$; $\epsilon_{xy} = 1,9$; $\epsilon_{zz} = 0,99$; $\mu_{xx} = 1,80$; $\epsilon_{xy} = 1,79$; $\mu_{zz} = 0,99$; параметры слоя H : $\epsilon_{xx} = 1,50$; $\epsilon_{xy} = 1,40$; $\epsilon_{zz} = 0,99$; $\mu_{xx} = 1,20$; $\mu_{xy} = 1,19$; $\mu_{zz} = 0,99$. Толщины слоев материалов равны четверти длин одной из волн ($\lambda_L = 1551$ нм), угол наклона оси анизотропии $\theta = 0,5^\circ$. На рис. 2, а представлена зависимость коэффициента отражения от угла падения, обладающая избирательными свойствами для этого кристалла и избирательными свойствами по углам.

Низкий коэффициент отражения ($R = 0,2$) в узкой области в окрестности нуля ($-4^\circ < \alpha_{inc} < 4^\circ$) и полное отражение в диапазонах от $\alpha_{inc} = \pm 4^\circ$ до $\alpha_{inc} = \pm 25^\circ$ являются интересным как с теоретической, так и с практической точки зрения. Важно, что полученная зависимость характеризуется высоким коэффициентом прямоугольности (0,99), низкой неравномерностью (0,01) в области пропускания ($-4^\circ < \alpha_{inc} < 4^\circ$), а также существованием областей полного внутреннего отражения (от $\alpha_{inc} = \pm 4^\circ$ до $\alpha_{inc} = \pm 25^\circ$).

Существование такой зависимости вполне обосновано. Действительно, при нормальном падении и при малых углах падения волновые числа в слоях структуры являются действительными и области непрохождения определяют-

ся только явлением многократного отражения. При существенных отклонениях от нормали волновые числа становятся комплексными, что означает затухание волны в пределах одного периода, причем мнимая часть быстро возрастает с увеличением угла падения и существенно превышает действительную в областях полного отражения.

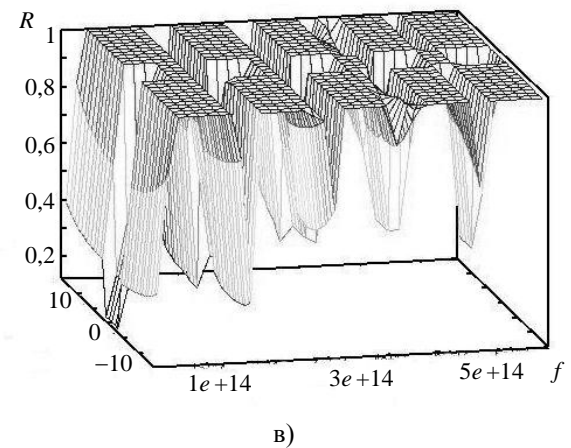
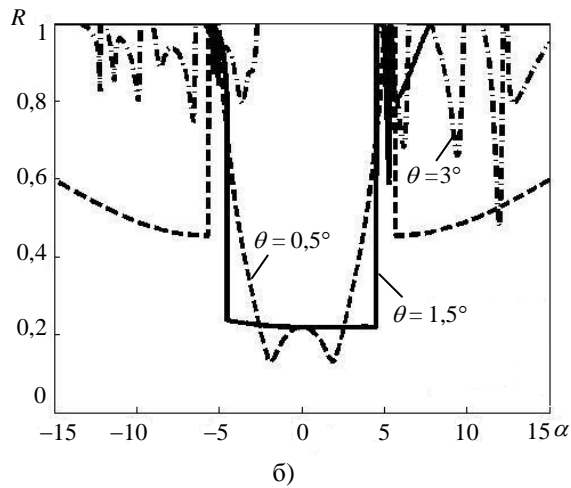
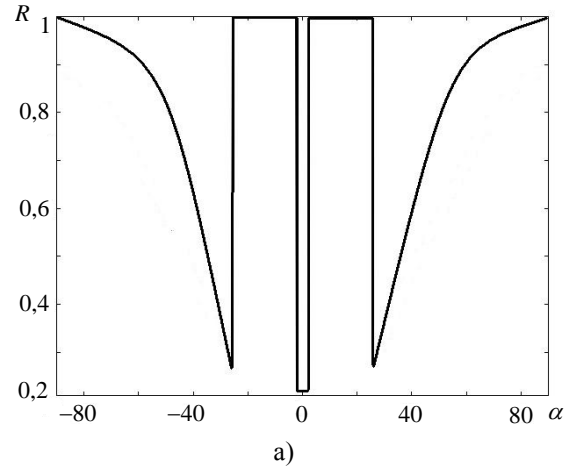


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения от: а) – угла падения; б) – угла падения для различных углов наклона оси анизотропии; в) – угла падения и частоты для фотонного кристалла (3)

Таким образом, области полного отражения определяются не явлением многократного отражения в структуре, а в первую очередь оптическими свойствами слоев. Появление мнимой части волнового числа связано с существованием всех девяти элементов тензоров (2) и их зависимостью от угла наклона оси анизотропии. Действительно, мнимые компоненты ε_{12} , ε_{21} уменьшаются с увеличением угла θ , мнимые компоненты ε_{13} , ε_{31} возрастают с увеличением угла, действительная компонента ε_{22} уменьшается от ε_{xx} до ε_{zz} с увеличением угла падения от 0 до $\pi/2$, ε_{23} , компонента ε_{33} увеличивается от ε_{zz} до ε_{xx} с увеличением угла падения от 0 до $\pi/2$, действительные компоненты ε_{23} , ε_{32} имеют максимум при $\theta = \pm 45^\circ$ и равны нулю при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = \pm 90^\circ$. Как следствие, дисперсионное уравнение четвертого порядка [5, 25], включающее элементы тензоров (2) и угол падения, дает четыре различных, в том числе и комплексных, волновых числа. На характеристике наблюдается небольшая несимметричность, но в области пропускания она почти не заметна и не влияет на прошедшую и отраженную волны.

Отметим, что аналогичные эффекты описаны в научной литературе, например, в работе [22] при исследовании зависимости коэффициента отражения от частоты. Комплексные волновые числа также исследовались в работах [20, 21] и связывались с причиной существования неоднородных (комплексных) волн в анизотропной слоистой среде. Отличительной особенностью представляемых результатов (рис. 2, а) является наличие избирательной амплитудно-угловой характеристики с минимумом отражения в нуле. Такая зависимость оказалась возможной только при наклоне оси анизотропии в многослойной гиротропной структуре и определяется как явлением многократного отражения, так и характеристиками слоев (комплексными волновыми числами).

Отклонение оси анизотропии от нормали приводит к усилению описанных эффектов, поскольку уже для нормального падения волны угол между волновым вектором и осью анизотропии значительно отличается от нуля. Зависимости коэффициента отражения от угла падения для наклона оси анизотропии $\theta = 0,5^\circ$, $\theta = 1,5^\circ$ и $\theta = 3^\circ$ представлены на рис. 2, б, из которого видно, что при $\theta = 3^\circ$ область пропускания волны в нуле отсутствует, поскольку волновые числа при этом угле комплексные уже при $\alpha_{inc} = 0^\circ$. Отметим, что зависимость волновых чисел от угла наклона оси анизотропии и угла падения очень сложная и, следовательно, установить какие-либо

общие закономерности для коэффициента отражения не представляется возможным.

Изменением частоты можно добиться пропускания волны в нуле практически при любых заданных параметрах кристалла. Зависимость коэффициента отражения от частоты и угла падения без учета частотной дисперсии представлена на рис. 2, в и показывает периодическую зависимость коэффициента отражения от частоты в окрестности $\alpha_{inc} = 0^\circ$.

4. Практическое применение. Полученные в данной работе результаты, с нашей точки зрения, могут найти широкое практическое применение в оптоэлектронике для проектирования оптических облучателей. В частности, боковое излучение любого источника, в том числе и оптического, является нежелательным и приводит к ухудшению электромагнитной совместимости оптических систем. С одной стороны, оно может быть источником помех для других оптических устройств, а с другой – рецептором помех от посторонних источников излучения. Уменьшение этого излучения является достаточно сложной и важной задачей оптоэлектроники. Различные методы решения этой проблемы описаны, например, в работе [26].

Для решения этой задачи могут быть использованы результаты, полученные в данной работе. В частности, структуру (5), размещенную перед излучателем, можно применять в качестве формирователя узконаправленной диаграммы. Она позволит сформировать диаграмму направленности шириной 8° и полностью отсесть боковое излучение в диапазоне углов от $\pm 4^\circ$ до $\pm 25^\circ$, уменьшив, таким образом, паразитное излучение. Отметим, что структура является достаточно тонкой, ее толщина составляет 6,56175 мкм. Как отмечалось выше, характеристика в области пропускания обладает малой неравномерностью и высоким коэффициентом прямоугольности. Однако к недостаткам относится высокий коэффициент отражения в области пропускания и боковое излучение при $\alpha_{inc} \geq 25^\circ$.

Результаты расчетов зависимости коэффициента отражения от угла падения и частоты для структуры (5) представлены на рис. 2, в. Из графика видно, что данная структура обладает избирательными свойствами как по углам, так и по частоте. Это позволяет использовать рассматриваемую структуру в качестве формирователя диаграммы направленности на некоторой конкретной частоте или в некотором конкретном диапазоне частот.

Поскольку свойства волны в фотонном кристалле (5) определяются соотношением длины волны и электромагнитных толщин слоев, то ана-

логичный формирователь диаграммы направленности можно построить в любом диапазоне частот.

Выводы. Рассмотрен одномерный анизотропный фотонный кристалл с произвольным направлением оси анизотропии. Найдены параметры кристалла, при которых минимум отражения наблюдается в окрестности нулевого угла падения. Получены резонансные характеристики отражения в плоскости углов падения. Результаты исследований, представленные в данной работе, могут найти применение для формирования диаграмм направленности излучателей оптического диапазона.

1. *Yablonovitch E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics / E. Yablonovitch // *Phys. Rev. Lett.* – 1987. – 58. – P. 2059–2062.
2. *Benisty H.* Photonic Crystals / H. Benisty, V. Berger, J.-M. Gerard at al. // *J. Phys.* – 2005. – 27. – P. 299–304.
3. *Qiu M.* Optimal design of a two-dimensional photonic crystal of square lattice with a large complete two-dimensional bandgap / M. Qiu, S. He // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2000. – 17. – P. 1027–1030.
4. *Ho K. M.* Photonic band gaps in tree-dimensions: new layer-by-layer periodic structures / K. M. Ho, C. T. Chan, C. M. Soukoulis at al. // *Solid State Commun.* – 1994. – 89. – P. 413–416.
5. *Vytovtov K. A.* Investigation of photonic crystals containing bianisotropic layers / K. A. Vytovtov, A. A. Bulgakov // *European Microwave Conf.: 35-th European Microwave Conf.* – Vol. 2. – Paris, 2005. – P. 1359–1362.
6. *Zhichao Ruan.* Coupling between plane waves and Bloch waves in photonic crystals with negative refraction / Zhichao Ruan, Min Qiu, Sanshui Xiao at al. // *Phys. Rev. B.* – 2005. – 71. – P. 045111.
7. *Gevorgyana A. H.* Chiral photonic crystals with an anisotropic defect layer: Oblique incidence / A. H. Gevorgyana // *Optics Communications.* – 2008. – 281, N. 20. – P. 5097–5103.
8. *Temelkurana B.* Experimental demonstration of photonic crystal based waveguides / B. Temelkurana, E. Ozbay // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – 74, N 4. – P. 25.
9. *Kumar N.* Photonic crystals as infrared broadband reflectors with different angles of incidence: a comparative study. *Progress in electromagnetic research* / N. Kumar, S. P. Ojha // *PIER.* – 2008. – 80. – P. 431–445.
10. *Sakamoto K.* Incident Angle Dependence of the Infrared Absorbance of Thin Rubbed Polyimide Films on CaF₂ and Si Substrates / K. Sakamoto, R. Arafune, S. Ushioda // *Appl. Spectrosc.* – 1997. – 51. – P. 541–544.
11. *Hongji Qi.* Nonpolarizing and polarizing filter design / Hongji Qi, Ruijin Hong, Kui Yi, Jianda Shao at al. // *Appl. Opt.* – 2005. – 44. – P. 2343–2348.
12. *Virginie Lousse.* Angular and polarization properties of a photonic crystal slab mirror / Virginie Lousse, Wonjoo Suh, Onur Kilic at al. // *Opt. Express.* – 2004. – 12. – P. 1575–1582.
13. *Lyubchanskii L. I.* Magnetic photonic crystals / L. I. Lyubchanskii, N. N. Dadoenkova, M. I. Lyubchanskii at al. // *J. Phys. D.* – 2003. – 36. – P. 277–287.
14. *Figotin A.* Nonreciprocal magnetic photonic crystals / A. Figotin, I. Vitebsky // *Phys. Rev. E.* – 2001. – 63. – P. 066609–1–066609.
15. *Strult J. W.* On the maintenance of vibrations through a medium endowed with a periodic structure / J. W. Strult, (Lord Rayleigh) // *Philos. Mag.* – 1887. – 24. – P. 145–159.
16. *Bloch F.* Quantenmechanik der elektronen in kristallgittern / F. Bloch // *Z. Phys.* – 1928. – 2. – P. 555–600.
17. *Abeles F.* Recherches sur la propagation des ondes electromagnetiques sinusoidales dan les milieu stratifies. Application aux conches minces / F. Abeles // *Ann. Phys.* – 1950. – 5. – P. 596–640, 706–782.

18. *Berreman D. W.* Optics in stratified and anisotropic media: 4x4 matrix formulation / D. W. Berreman // *J. Opt. Soc. Am.* – 1972. – 62. – P. 502–510.
19. *Teitler S.* Refraction in stratified anisotropic media / S. Teitler, B. W. Hennis // *J. Opt. Soc. Am.* – 1970. – 60. – P. 830–834.
20. *Bulgakov A. A.* Inhomogeneous Waves and Energy Localization in Dielectric Superlattices / A. A. Bulgakov, S. A. Bulgakov, M. Nieto-Vesperinas // *Phys. Rev. B.* – 1998. – 58. – P. 4438–4446.
21. *Bulgakov A. A.* Complex polaritons in periodic layered media / A. A. Bulgakov, S. A. Bulgakov, M. Nieto-Vesperinas // *Phys. Rev. B.* – 1995. – 52. – P. 10788–10796.
22. *Kokody D.* Analysis of electromagnetic characteristics of multi-layered periodic structures with turning layers / D. Kokody, S. L. Prosvirnin // *Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: proc. 8-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory.* – Kharkov, 2000. – Vol. 1. – P. 256–259.
23. *Терентьев Ю. М.* Матрица преобразования N–слойной периодической среды с анизотропными слоями / Ю. М. Терентьев, К. А. Вытовтов // *Радиотехника и электрон.* – 2000. – 45, № 3. – С. 279–281.
24. *Булгаков А. А.* Влияние трансляционной симметрии на электродинамические свойства структуры полупроводник-диэлектрик в магнитном поле / А. А. Булгаков, И. К. Кононенко // *Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – Х., 2000. – 5, № 3. – С. 69–78.
25. *Басс Ф. Г.* Высоочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками / Ф. Г. Басс, А. А. Булгаков, А. П. Тетеров. – М.: Наука, 1989. – 288 с.
26. *Уайт Д.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт. – М.: Сов. радио, 1977. – 352 с.

ANGULAR SELECTIVE PROPERTIES OF ONE-DIMENSIONAL ANISOTROPIC PHOTONIC CRYSTALS

K. A. Vytovtov, A. D. Arhipov

In the work an anisotropic photonic crystal with an arbitrary direction of an anisotropy axis is considered. The dependence of the reflection coefficients on an incidence angle of a plane harmonic wave on a plane-parallel slab is studied. The resonant characteristics in the incidence angle plane are obtained. It is offered to use them as formers of optical radiators patterns.

Key words: photonic crystal, radiation pattern, reflection coefficient, incidence angle.

КУТОВІ ВИБІРНІ ВЛАСТИВОСТІ ОДНОМІРНИХ АНІЗОТРОПНИХ ФОТОННИХ КРИСТАЛІВ

К. А. Витовтов, А. Д. Архипов

Розглядається одновимірний анизотропний фотонний кристал з довільним напрямком вісі анизотропії. Досліджено залежність коефіцієнтів відбиття від кута падіння плоскої гармонічної хвилі на плоско паралельну пластину. Знайдені параметри кристалу, за яких мінімум відбиття спостерігається поблизу нульового кута падіння. Отримано резонансні характеристики відбиття в площині кутів падіння. Запропоновано їх використання у якості формувачів діаграм спрямованості оптичних випромінювачів.

Ключові слова: фотонний кристал, діаграма спрямованості, коефіцієнт відбиття, кут падіння.

Рукопись поступила 18 сентября 2009 г.

