

РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ДИФРАКЦИЯ И РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

УДК 537.774.6

Н. В. СИДОРЧУК, С. Л. ПРОСВИРНИН

Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: ryazan@rian.kharkov.ua, prosvirn@rian.kharkov.ua

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ФОТОННОЙ СТРУКТУРЕ С ДЕФЕКТНОЙ МОДОЙ

Исследуется резонансное увеличение коэффициента прохождения плоской электромагнитной волны через многослойный трехмерный полностью диэлектрический фотонный кристалл, в котором для получения высокой плотности моды специально создан дефектный слой с включениями активной среды. Проведено сравнение значений коэффициента прохождения для структур с разными толщинами дефектного слоя и с разными значениями мнимой части диэлектрической проницаемости активной среды.

Ключевые слова: трехмерная периодическая структура, запрещенная зона, дефектный слой, резонанс прохождения

1. Введение

Как известно, излучение – это процесс перехода квантовой системы из возбужденного в некоторое стабильное состояние с меньшей энергией под влиянием индуцирующих фотонов, которые имеют такую же энергию, как энергия перехода. Если $N(t)$ – это число источников излучения в возбужденном состоянии в момент времени t , то величина $N(t)$ убывает в соответствии с уравнением $dN(t)/dt = -\alpha N(t)$, где α – это интенсивность излучения.

Согласно золотому правилу Ферми интенсивность излучения зависит от двух факторов, а именно: от внутренней квантовой структуры источника излучения и от электромагнитного поля [1]. В соответствии с законом Парселла интенсивность излучения представляет собой величину, которая пропорциональна плотности оптического электромагнитного поля на частоте квантового перехода, называемой в фотонике плотностью моды.

Интенсивность излучения может изменяться в зависимости от граничных условий для электромагнитного поля вблизи возбужденного атома

или молекулы. В настоящее время известно, что влияние окружающих структур на излучение атомов представляет собой, по сути, классический эффект [2]. Вклад структуры состоит в изменении плотности электромагнитной моды. Поэтому для того чтобы получить максимальную интенсивность излучения возбужденной системы, необходимо обеспечить благоприятное распределение электрического поля с хорошим пространственным перекрытием с излучающей средой и максимизировать его интенсивность именно в активной зоне.

Таким образом, когда оптимизируется взаимодействие между светом и веществом в приборах, важно не только контролировать пространственное распределение электромагнитного поля в активных элементах, находящихся в возбужденном состоянии, но также настроить систему в резонанс для увеличения интенсивности поля.

Исключительно перспективными и интересными объектами для работы с большими плотностями электромагнитной энергии становятся сегодня периодические структуры фотоники с неоднородностями, которые поддерживают дефектные моды в частотных полосах непрозрачности. Интенсивность излучения активной среды, поме-

щенной в дефекте периодической структуры, может многократно увеличиваться. Большинство результатов исследования излучения в фотонных кристаллах относится к случаю одномерных слоистых и безграничных периодических структур (см., например, аналитическое изучение в [3] и результаты численного моделирования в [4]).

Наша цель состоит в исследовании резонансного возрастания коэффициента прохождения плоской электромагнитной волны через многослойный трехмерный фотонный кристалл, в котором для получения высокой плотности моды специально создан дефектный слой с включениями активной среды.

2. Трехмерная периодическая структура

В качестве базисного элемента искусственной периодической структуры мы выбрали диэлектрический круговой цилиндр с радиусом a и длиной l . Эти цилиндрические элементы погружены в диэлектрическую вмещающую среду, и их оси ориентированы параллельно оси Oz . Относительная диэлектрическая проницаемость цилиндрических элементов и вмещающей среды имеет значение ϵ_c и ϵ_h соответственно. Обозначим \vec{a}_j , где $j = \{1, 2, 3\}$, векторы основных трансляций, описывающие элементарную ячейку в периодической решетке [5]. Под решеткой понимается система точек, в которых находятся элементы структуры. Решетка определяется векторами основных трансляций таким образом, что размещение базисных цилиндрических элементов в структуре выглядит одинаково из точки \vec{r} и из каждой точки \vec{r}' , сдвинутой на вектор, кратный целому числу векторов \vec{a}_j [6],

$$\vec{r}' = \vec{r} + n_1\vec{a}_1 + n_2\vec{a}_2 + n_3\vec{a}_3.$$

Здесь n_1, n_2, n_3 – произвольные целые числа. Мы предполагаем, что \vec{a}_j – это вектор примитивной трансляции, т. е. у решетки нет ячейки меньшего объема, чем $\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \times \vec{a}_3$, которая могла бы быть ее периодической ячейкой.

Теперь построим фотонную структуру как искусственный кристалл, который состоит из цилиндрических базисных элементов и имеет периодическую структуру, показанную на рис. 1. Базисные элементы размещены в соответствии со следующим выбором трансляционных векторов: $\vec{a}_1 = l\vec{e}_x$, $\vec{a}_2 = l\vec{e}_y$ и $\vec{a}_3 = (l/2)\vec{e}_x + (l/2)\vec{e}_y + l\vec{e}_z$.

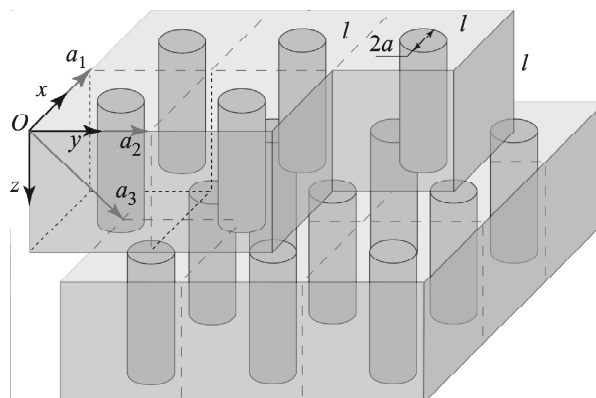


Рис. 1. Двухслойный фрагмент рассматриваемой полностью диэлектрической периодической структуры

Структура может быть построена из кубических блоков, объединенных в слой. Эти блоки отмечены штриховыми и пунктирными линиями. Наименьшая периодическая ячейка структуры – это параллелепипед, построенный на векторах примитивных трансляций.

3. Спектр пропускания неактивной многослойной структуры

Исследуем спектральные свойства многослойной регулярной структуры и структуры с дефектом при нормальном падении плоской электромагнитной волны. Вследствие симметрии структуры прохождение и отражение не зависят от поляризации нормально падающей волны.

Мы рассматриваем семислойный фотонный кристалл, который схематически показан на рис. 2. Дефект вводится в кристалл путем изменения его среднего слоя. В случае регулярной структуры этот средний слой не отличается от других слоев фотонного кристалла. Однако, если этот слой играет роль дефектного, он может иметь толщину h , не равную l , и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_d = \epsilon'_d - i\epsilon''_d$ цилиндрических элементов, отличающуюся от ϵ_c . На рис. 2 представлена структура, в которой средний слой составлен из цилиндрических элементов с диэлектрической проницаемостью ϵ_d , отличающейся от ϵ_c , а вмещающая среда такая же, как у всего остального фотонного кристалла.

Для численного моделирования прохождения электромагнитной волны через структуру использован строгий численный метод. Основой метода являются объемные интегральные уравнения мак-

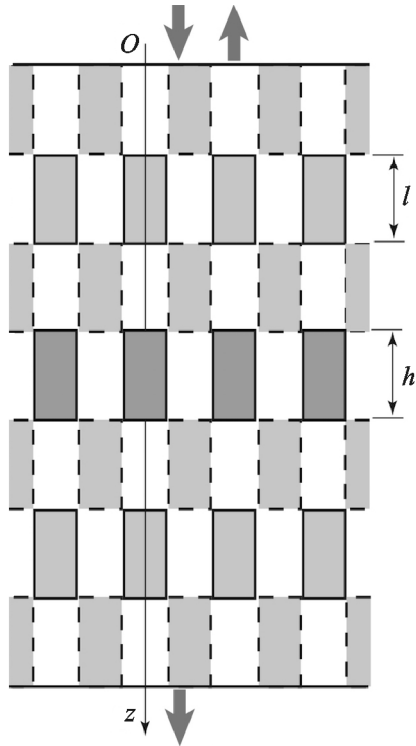


Рис. 2. Рассматриваемая структура с дефектом

роскопической электродинамики для решения задач дифракции электромагнитных волн на многослойных магнитоэлектрических периодических в двух направлениях структурах [7]. Электромагнитное поле в некоторой точке представляется суммой полей падающей волны, электрических и магнитных зарядов и токов, наведенных в структуре падающей волной. Эти представления для поля превращаются в интегральные уравнения, если точка наблюдения находится внутри рассеивающей структуры. Метод не накладывает какие-либо существенные ограничения на форму периодической ячейки и значения диэлектрической проницаемости материалов, из которых состоит структура. Диэлектрическая проницаемость может быть комплексной величиной с мнимой частью как положительной, так и отрицательной.

Мы предполагаем, что $a/l = 0.25$, диэлектрическая проницаемость основной вмещающей среды и диэлектрика цилиндрических элементов имеет значение $\epsilon_h = 2.1$ (кварц) и $\epsilon_c = 12.8$ (кремний) соответственно. Значения диэлектрической проницаемости соответствуют ближнему инфракрасному диапазону длин волн. Введем безразмерный параметр l/λ , пропорциональный частоте. Зависимость абсолютной величины коэффициен-

та прохождения регулярной структуры и структуры с дефектом от безразмерной нормированной частоты $\kappa = l/\lambda$ показана на рис. 3. В дальнейшем эту нормированную частоту для кратности будем называть просто частотой. Дефект вносится изменением диэлектрической проницаемости цилиндрических элементов $\epsilon_d = 2.72$ (эпоксидный компаунд). На частотах ниже 0.42 коэффициент прохождения такой же, как у однородного слоя с некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью. На этих частотах зоны непрозрачности (запрещенные зоны) отсутствуют. Регулярная структура имеет первые две запрещенные зоны на частотах примерно от 0.425 до 0.455 и от 0.468 до 0.507 соответственно.

В случае структуры с дефектом мы видим некоторое расширение запрещенных зон и, что является наиболее важным, резкие максимумы пропускания в пределах запрещенных зон регулярной структуры. Исследуем детально пики пропускания, относящиеся к полосам частот первой и второй запрещенных зон. Максимум пропускания в пределах первой запрещенной зоны наблюдается на частоте около $\kappa_1 = 0.445$. В пределах второй запрещенной зоны имеется два узких максимума пропускания на частотах $\kappa_2 = 0.487$ и $\kappa_3 = 0.512$.

В табл. 1 представлены данные о вариации резонансных частот полного прохождения в зави-

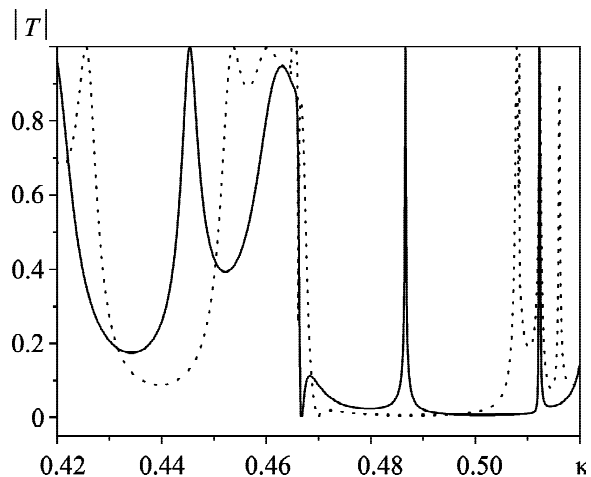


Рис. 3. Зависимость абсолютной величины коэффициента прохождения T неактивной структуры от нормированной частоты в случае регулярной структуры (пунктирная линия, $h = l$, $\epsilon_d = \epsilon_c$) и структуры с дефектным средним слоем (сплошная линия, $h = l$, $\epsilon_d = 2.72$) при $a/l = 0.25$, $\epsilon_h = 2.1$, $\epsilon_c = 12.8$

Таблица 1. Вариации резонансных частот полного прохождения в зависимости от малых изменений толщины дефектного слоя структуры

h/l	κ_1	κ_2	κ_3
0.969	0.4465	0.4885	0.5122
0.988	0.4458	0.4874	0.5122
1.000	0.4454	0.4866	0.5122
1.006	0.4451	0.4862	0.5123

симости от малых изменений толщины дефектного слоя структуры. Как легко видеть, резонансные частоты κ_1 и κ_3 более стабильны, чем κ_2 . Этот факт является следствием различия в пространственных распределениях резонансных электромагнитных полей.

На рис. 4 представлены распределения интенсивности электрического поля вдоль линии, являющейся осью одного из цилиндров дефектного слоя, по всей толщине фотонного кристалла на трех резонансных частотах полного прохождения (κ_1 , κ_2 и κ_3). Амплитуда падающей волны предполагается равной единице. Во втором резонансе распределение интенсивности имеет максимальное значение внутри дефектного слоя и ближайших соседних слоев. В слу-

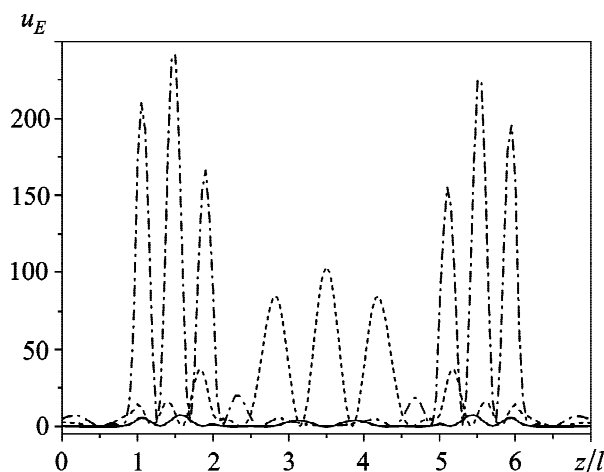


Рис. 4. Распределение интенсивности электрического поля u_E вдоль оси цилиндра дефектного слоя неактивной структуры на частоте $\kappa_1 = 0.4454$ (сплошная линия), на частоте второго пика пропускания $\kappa_2 = 0.48661$ (штриховая линия) и на частоте $\kappa_3 = 0.5122$ (штрих-пунктирная линия) для структуры с дефектным средним слоем при $h = l$, $a/l = 0.25$, $\epsilon_h = 2.1$, $\epsilon_c = 12.8$, $\epsilon_d = 2.72$. Падающая волна имеет единичную амплитуду

чаях первого и третьего резонансов максимумы распределений находятся вне середины фотонного кристалла. Интенсивность рассчитывается с помощью метода на основе интегральных уравнений макроскопической электродинамики для точек, расположенных внутри рассеивающей структуры.

Таким образом, резонансное электромагнитное колебание на частоте κ_2 является перспективным для увеличения интенсивности излучения при использовании активного материала для изготовления цилиндров дефектного слоя.

4. Спектр пропускания активной структуры

При проведении вычислений будем полагать зависимость полей от времени в виде $\exp(i\omega t)$. Для описания возбужденной активной среды используется комплексная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_d = \epsilon'_d - i\epsilon''_d$ с положительной мнимой частью, $\epsilon''_d < 0$. Эффекты насыщения игнорируются, т. е. мы предполагаем, что мнимая часть диэлектрической проницаемости активной среды может иметь некоторое заданное постоянное значение.

В этом исследовании мы используем параметры активного материала, который представляет собой эпоксидный компаунд с взвешенными в нем полупроводниковыми квантовыми точками. Этот материал часто применяется в экспериментальных исследованиях по созданию усилителей и лазеров в плазмонике [8]. Реальная часть проницаемости активной среды является почти постоянной, $\epsilon'_d = 2.72$, поскольку в ней доминирует проницаемость эпоксидного компаунда. Мнимая часть зависит от частоты. Эту частотную зависимость можно аппроксимировать лоренцевой кривой. Поскольку исследование выполняется в монохроматическом приближении, мы полагаем, что на некоторой определенной частоте значение ϵ''_d будет постоянным. Значение диэлектрической проницаемости активного материала соответствует ближнему инфракрасному диапазону длин волн.

В рассматриваемом случае мы предполагаем, что цилиндрические элементы дефектного слоя состоят из активного материала. Все другие среды фотонной структуры представляют собой диэлектрики, не имеющие диссипативных свойств

и дисперсии. С использованием такого приближенного подхода найдена зависимость резонансного коэффициента прохождения активной структуры от величины ϵ_d'' (см. рис. 5). Амплитуда падающей волны выбрана равной единице. Имеется некоторый уровень возбуждения активного вещества (накачки), при котором происходит эффективное взаимодействие электромагнитного поля с активной средой дефектного слоя структуры. Соответствующее значение ϵ_d'' близко к -0.05 . При дальнейшем увеличении мнимой части диэлектрической проницаемости электромагнитное поле хуже проникает в активную среду, вследствие чего ослабевает его взаимодействие с этой средой и уменьшается коэффициент прохождения. Частотные зависимости для дефектной структуры с активной средой имеют характер, аналогичный зависимости на рис. 3 (сплошная линия). Отличие заключается в более высоких значениях коэффициента прохождения на частоте резонанса, которые приведены на рис. 5. Значение диэлектрической проницаемости выбранной активной среды, находящейся в возбужденном состоянии, $\epsilon_d = 2.72 + i0.05$ далее рассматривается как близкое к оптимальному значению, которое необходимо для настройки структуры на максимальное резонансное усиление падающей электромагнитной волны.

Распределение интенсивности резонансного электрического поля для случая структуры с

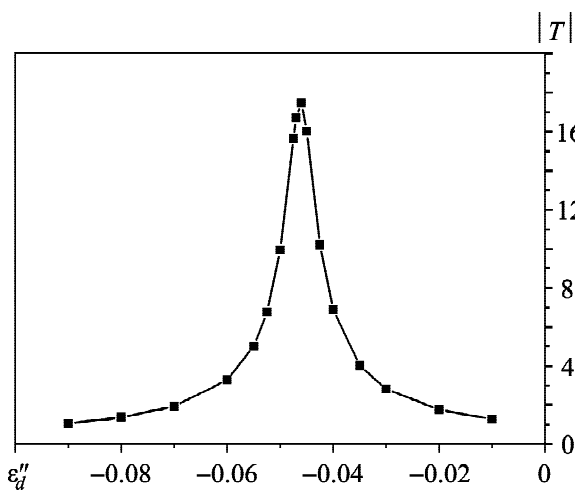


Рис. 5. Абсолютная величина коэффициента прохождения T активной структуры в зависимости от ϵ_d'' на частоте $\kappa_2 = 0.4866$, при $h = l$, $\epsilon_d = 2.72 - i\epsilon_d''$, $a/l = 0.25$, $\epsilon_h = 2.1$, $\epsilon_c = 12.8$

активным дефектным слоем в возбужденном состоянии показано на рис. 6. Для сравнения на рисунке представлено также распределение интенсивности без накачки. Из этих данных следует, что возбуждение активного материала не изменяет качественно распределение интенсивности в резонансных условиях. Максимум распределения находится внутри возбужденного дефектного слоя структуры. Однако интенсивность электрического поля оказывается значительно больше, чем в случае, когда накачки нет. Таким образом, введение активной среды в дефектный слой рассматриваемой фотонной структуры не разрушает резонанс пропускания в зоне непрозрачности. Этот факт имеет большое значение для приложений, относящихся к усилению входного электромагнитного излучения.

Исследуем влияние толщины дефектного слоя на резонансное пропускание активной структуры. Для численного моделирования применяется описанная выше приближенная модель, в которой не учитываются эффекты насыщения. Результаты представлены на рис. 7. Небольшое увеличение толщины дефектного слоя приводит к многократному возрастанию коэффициента прохождения активной структуры. Значительное возрастание усиления происходит благодаря точной настройке на резонансный режим.

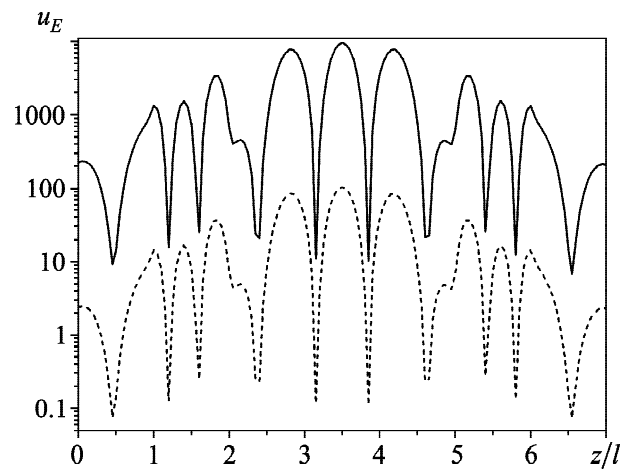


Рис. 6. Распределение интенсивности электрического поля u_E вдоль оси цилиндра дефектного слоя активной (сплошная линия, $\epsilon_d'' = -0.05$) и, для сравнения, неактивной (пунктирная линия, $\epsilon_d'' = 0$) структуры на резонансной частоте $\kappa_2 = 0.4866$ в случае, когда дефектным является средний слой, $h = l$, $\epsilon_d = 2.72 - i\epsilon_d''$, $a/l = 0.25$, $\epsilon_h = 2.1$, $\epsilon_c = 12.8$. Падающая волна имеет единичную амплитуду

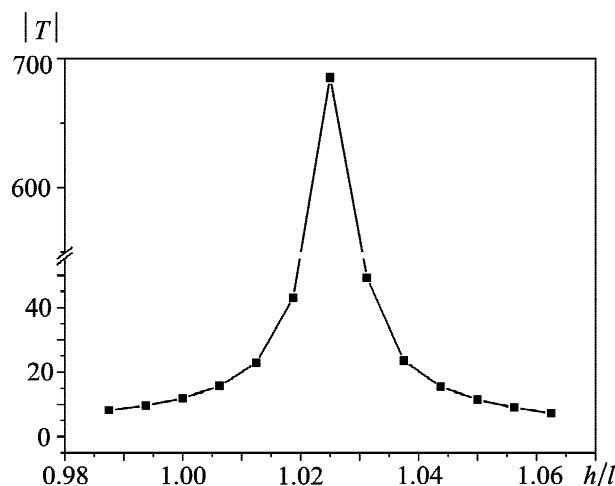


Рис. 7. Максимальный коэффициент прохождения активной структуры в зависимости от толщины h дефектного слоя вблизи частоты $\kappa_2 = 0.4866$ при $\varepsilon_d = 2.72 + i0.05$, $a/l = 0.25$, $\varepsilon_h = 2.1$, $\varepsilon_c = 12.8$

5. Выводы

Коэффициент прохождения многослойного трехмерного полностью диэлектрического фотонного кристалла, в котором нарушена периодичность путем изменения толщины или диэлектрической проницаемости одного слоя, в полосах частот непрозрачности имеет резкие резонансные максимумы полного пропускания в результате возбуждения дефектных мод. Среди дефектных мод существуют такие моды, у которых максимальная интенсивность электрического поля наблюдается именно в дефектном слое. Если дефект создан введением в слой активного материала в возбужденном состоянии, эти моды обеспечивают эффективное резонансное взаимодействие электромагнитного поля с активной средой. В результате происходит существенное резонансное увеличение коэффициента прохождения плоской электромагнитной волны через активный фотонный кристалл.

Авторы благодарят за финансовую поддержку Украинский научно-технологический центр и Национальную академию наук Украины (совместный проект 5958).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barnes W. L. Topical review. Fluorescence near interfaces: the role of photonic mode density // *J. Mod. Opt.* – 1998. – Vol. 45, No. 4. – P. 661–699.

2. Dowling J. P. and Bowden C. M. Atomic emission rates in inhomogeneous media with applications to photonic band structures // *Phys. Rev. A.* – 1992. – Vol. 46, No. 1. – P. 612–622. DOI: 10.1103/PhysRevA.46.612
3. Bendickson J. M. and Dowling J. P. Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures // *Phys. Rev. E.* – 1996. – Vol. 53, No. 4. – P. 4107–4121. DOI: 10.1109/QELS.1996.865760
4. Sukhoivanov I. A. and Guryev I. V. *Photonic Crystals.* – Berlin–Heidelberg: Springer, 2009. – 242 p.
5. Lourtioz J.-M., Benisty H., Berger V., Gerard J.-M., Maystre D., and Tchelmonov A. *Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices.* – Berlin–Heidelberg: Springer, 2008. – 514 p.
6. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. – М.: Наука, 1978. – 791 с.
7. Сидорчук Н. В. Резонансное рассеяние волн плоскими периодическими структурами, расположенными между двумя однородными средами // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 250–262.
8. Savelev R. S., Shadrivov I. V., Belov P. A., Rosanov N. N., Fedorov S. V., Sukhorukov A. A., and Kivshar Y. S. Loss compensation in metal-dielectric layered metamaterials // *Phys. Rev. B.* – 2013. – Vol. 87, Is. 11. – id.115139. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115139

REFERENCES

1. BARNES, W. L., 1998. Topical review. Fluorescence near interfaces: the role of photonic mode density. *J. Mod. Opt.*, vol. 45, no. 4, pp. 661–699.
2. DOWLING J. P. and BOWDEN C. M., 1992. Atomic emission rates in inhomogeneous media with applications to photonic band structures. *Phys. Rev. A.*, vol. 46, no. 1, pp. 612–622. DOI: 10.1103/PhysRevA.46.612
3. BENDICKSON J. M. and DOWLING J. P., 1996. Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures. *Phys. Rev. E.*, vol. 53, no. 4, pp. 4107–4121. DOI: 10.1109/QELS.1996.865760
4. SUKHOIVANOV I. A. and GURYEV I. V., 2009. *Photonic Crystals.* Berlin-Heidelberg: Springer.
5. LOURTIOZ J.-M., BENISTY H., BERGER V., GERARD J.-M., MAYSTRE D., and TCHELMONOV A., 2008. *Photonic Crystals: Towards Nanoscale Photonic Devices.* Berlin-Heidelberg: Springer
6. KITTEL C., 1978. *Introduction to Solid State Physics.* Moscow: Nauka (in Russia).
7. SYDORCHUK N. V., 2008. Resonant Wave Scattering by Plane Periodic Structures Bounded by Two Homogeneous Media. *Radiofizika i Radioastronomia*, vol. 13, no. 4, pp. 250–262 (in Russia).
8. SAVELEV R. S., SHADRIVOV I. V., BELOV P. A., ROSANOV N. N., FEDOROV S. V., SUKHORUKOV A. A., and KIVSHAR Y. S., 2013. Loss compensation in metal-dielectric layered metamaterials. *Phys. Rev. B.*, vol. 87, no. 11, id. 115139. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.115139

N. V. Sydorochuk and S. L. Prosvirnin

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine

RADIATION INTENSITY INCREASING
IN A DEFECT MODE
BASED THREE-DIMENSIONAL
PHOTONIC STRUCTURE

The resonant enhancement of a plane electromagnetic wave transmission through a multi-layered three-dimensional all-dielectric photonic crystal, in which a defect layer with active medium inclusions is designed specifically to obtain a high-density mode, has been investigated. A comparison of the transmission coefficients for the structures with different defect layer thicknesses and different imaginary parts of the active medium dielectric constant is performed.

Key words: three-dimensional periodic structure, band gap, defect layer, transmission resonance

Н. В. Сидорчук, С. Л. Просвірнін

Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ
ВИПРОМІНЮВАННЯ В ТРИВИМІРНІЙ ФОТОННІЙ
СТРУКТУРІ З ДЕФЕКТНОЮ МОДОЮ

Досліджується резонансне підвищення коефіцієнта проходження плоскої електромагнітної хвилі через багатошаровий тривимірний повністю діелектричний фотонний кристал, в якому для отримання високої щільності моди спеціально створено дефектний шар із включеннями активного середовища. Виконано порівняння значень коефіцієнта проходження для структур з різними товщинами дефектного шару і з різними значеннями уявної частини діелектричної проникності активного середовища.

Ключові слова: тривимірна періодична структура, заборонена зона, дефектний шар, резонанс проходження

Статья поступила в редакцию 22.04.2015