

УДК 535.4

ФОКУСИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ФОТОННЫМИ КРИСТАЛЛАМИ

© 2022 г. А. Ю. Ветлужский*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук”, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: vay@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 22.06.2022 г.

Рассматриваются методы фокусировки электромагнитных волн, основанные на использовании двумерных фотонных кристаллов, образованных металлическими элементами. Физическая основа разработки методов заключается в проявлении такими фотонными кристаллами на частотах первой разрешенной зоны свойств однородной среды с ультранизкими значениями показателя преломления.

DOI: 10.31857/S0367676522100234

ВВЕДЕНИЕ

Фотонные кристаллы (ФК) – среды с периодически меняющейся в пространстве диэлектрической проницаемостью с характерным масштабом периодичности, сопоставимым с длиной волны электромагнитного излучения. Ключевое понятие теории фотонных кристаллов – запрещенная зона, означающее полосу частот, в пределах которой подавляется распространение электромагнитных волн через ФК. Физическая природа такого подавления заключается в брэгговском рассеянии излучения на периодических неоднородностях среды. Таким образом, спектр пропускания любого ФК представляет собой чередование запрещенных и разрешенных зон, при этом в диапазоне последних излучение практически свободно проходит через ФК.

Области практического применения ФК существенным образом зависят от характера пространственной периодичности кристалла. Одномерные ФК могут, например, рассматриваться как основа эффективных резонаторов радио- и оптического диапазонов [1], двумерные кристаллы – как базовый элемент различного рода волноводных и преобразующих световые потоки устройств [2], трехмерные, способные к формированию полных запрещенных зон кристаллы могут обеспечить полный контроль спонтанного испускания фотонов, что позволит, в принципе, создавать беспороговые лазеры [3]. Однако, несмотря на уникальные свойства трехмерных структур и проводимые в последние годы их все-

сторонние теоретические исследования, непосредственная практическая реализация таких ФК для использования в оптическом диапазоне все еще представляет значительные трудности. Поэтому двумерные ФК, создание которых современными технологическими методами не составляет сложностей, а интересные физические свойства выглядят на настоящее время даже более разнообразными, чем у их трехмерных аналогов, вызывают особый интерес в силу возможности непосредственного практического применения.

Особое место среди ФК занимают металлические структуры (проволочные среды, *wire media*). Наиболее распространенным их видом являются двумерно-периодические решетки, образованные цилиндрическими элементами малого радиуса, имеющие высокую проводимость в радио- и инфракрасном диапазонах. Основной особенностью металлических ФК, отличающей их от диэлектрических структур, является наличие полной низкочастотной запрещенной зоны, формирующейся при E – поляризации излучения. На рис. 1 представлен спектр пропускания металлического ФК, представляющего собой квадратную решетку круговых алюминиевых цилиндров, при прохождении волн в направлении ГХ или (10) в терминах индексов Миллера. Расчеты здесь и далее проводились методом самосогласованных уравнений [4], реализованном в системе научных расчетов MATLAB. Для описания электрофизи-

ческих свойств элементов использовалась дисперсионная модель Друдэ:

$$\epsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2}, \quad \epsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \gamma}{\omega^3 + \omega \gamma^2},$$

где $\epsilon'(\omega)$ и $\epsilon''(\omega)$ – частотно зависимые действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, ω_p – плазменная частота, γ – фактор затухания, равные для алюминия соответственно 3570 и 19.4 ТГц [5].

Физический механизм, приводящий к формированию первой запрещенной зоны в металлическом ФК, не связан с брэгговским рассеянием, а может быть объяснен на основе проведения прямой аналогии между возбуждением среды из тонких проводников с поведением плазменных образований в твердом теле. Существование низко-частотной запрещенной зоны позволяет говорить о том, что на частотах ниже пороговой (плазменной) металлические ФК могут рассматриваться в качестве материалов с отрицательными значениями диэлектрической проницаемости (ϵ – негативных сред). Кроме того, на частотах выше плазменной такие структуры характеризуются значениями эффективного показателя преломления меньшими единицы [6], что дает основания рассматривать их не только как ФК, но и как своеобразные метаматериалы.

Описанные свойства двумерных металлических ФК обуславливают возможность их использования в качестве эффективных устройств преобразования пространственного распределения электромагнитного излучения, в частности, фокусирующих систем оптического диапазона. Важным этапом исследований в этом направлении явилась публикация на рубеже веков двух работ [7, 8]. В первой указывалось на тот факт, что линзы из метавещества, обладающего отрицательным показателем преломления, способны формировать изображение источника излучения без искажений, связанных с дифракционным пределом. Это объяснялось усилением в таких средах эванесцентных (затухающих) волн, присутствующих в спектре излучения любого точечного источника. Во второй работе была продемонстрирована структура, обладающая одновременно отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостей и состоящая из чередующихся слоев тонких металлических проволок и кольцевых разомкнутых резонаторов. Не имея прямого отношения к ФК, тем не менее, эти работы определили большой интерес к исследованиям, связанным с поиском путей реализации метаматериалов, демонстрирующих эффекты отрицательного преломления, в роли которых выступали различного рода ФК, рассматриваемые в качестве основы для создания суперлинз [9–11].

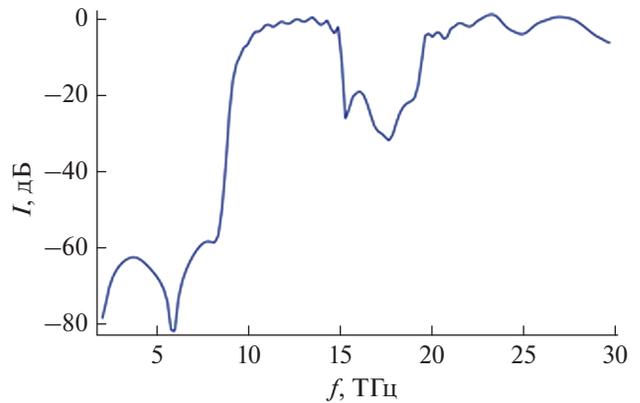


Рис. 1. Спектр пропускания металлического ФК. Период структуры равен 10 мкм, радиус элементов 0.5 мкм. I – нормированная интенсивность поля, прошедшего через кристалл.

Кроме фокусировки излучения за счет отрицательного преломления в ФК, известны работы по созданию фокусирующих систем с высоким разрешением на основе эффектов пространственной дисперсии в металлических ФК [12]. Значительное развитие получили исследования, связанные с разработкой субволновых фокусирующих фотонно-кристаллических систем, аналогичных по своим свойствам градиентной линзе Микаэляна. В таких ФК эффективный показатель преломления за счет изменения геометрических параметров элементов либо постоянной решетки меняется по определенному закону в направлении, перпендикулярном оптической оси, за счет чего достигается фокусировка излучения на “теневого” поверхности линзы [13, 14]. В последние годы активно исследуются линзы на основе ФК, имеющих необычные дисперсионные свойства, характеризующиеся наличием участков нулевой кривизны на изочастотных диаграммах. При взаимодействии излучения с такими ФК это приводит к эффекту суперколлимации [15, 16], физически заключающемуся в том, что в силу перпендикулярности векторов Пойтинга отдельных модовых составляющих излучения изочастотным контурам на частотах, соответствующих прямолинейным участкам контуров, все моды распространяются в одном направлении, приводя к возникновению недифрагирующих лучей в ФК.

Настоящая работа посвящена обсуждению ряда методов фокусировки излучения, в основе которых лежат дифракционные эффекты на границах структурно однородных ФК. К их числу относятся эффекты отражения и преломления, приводящие к высокой степени локализации излучения в ограниченных областях пространства за счет электродинамических свойств металлических ФК.

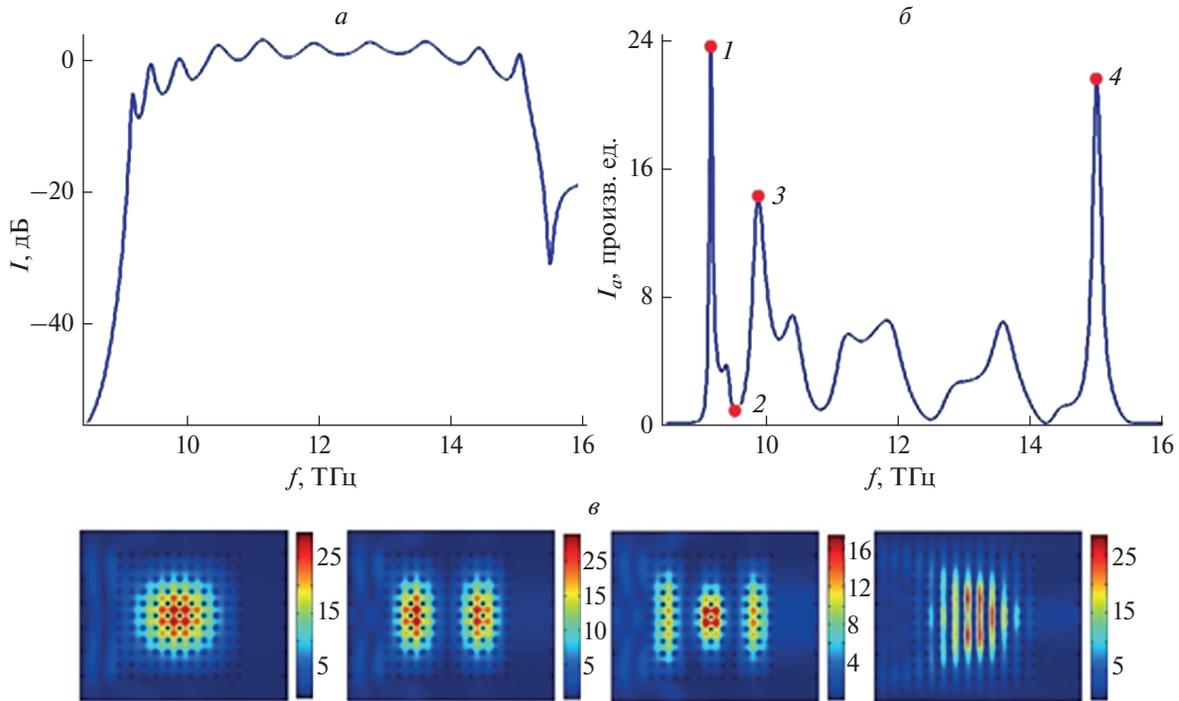


Рис. 2. Спектр пропускания 121-элементного (11 на 11) металлического ФК в диапазоне частот, соответствующем первой разрешенной зоне на рис. 1 (а). Спектральное представление абсолютной интенсивности I_a в центральной области ФК (б). Картины пространственного распределения поля на четырех частотах, отмеченных на рис. 2б (в). Направление прихода волн на рис. 2в — слева направо.

ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ СОБСТВЕННЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФК

Рассмотрим подробнее спектр пропускания металлического ФК, представленный на рис. 1, в диапазоне частот первой разрешенной зоны. Рисунок 2а демонстрирует существование в этой полосе частот десяти пиков — на один меньше, чем число рядов структуры в направлении распространения падающей волны. Рисунок 2б описывает спектральную зависимость интенсивности поля в этом же диапазоне, рассчитанную в центральной области ФК и представляющую собой чередование ярко выраженных максимумов и минимумов. Наибольшей амплитудой обладают первый и последний максимумы, сформировавшиеся непосредственно на краях разрешенной зоны.

Для выяснения физического содержания процессов, приводящих к наблюдаемым результатам, рассмотрим пространственные картины поля в ФК (рис. 2в), построенные на частотах, соответствующих первому (9.16 ТГц), второму (9.44 ТГц), третьему (9.87 ТГц) и последнему — десятому (15.01 ТГц) пикам пропускания ФК. Этим же частотам соответствуют уровни интенсивности излучения внутри ФК, отмеченные точками 1–4 на рис. 2б.

Представленные графики демонстрируют, что на указанных частотах имеются области высокой локализации поля во внутренних областях ФК, причем их количество соответствует порядковому номеру максимума пропускания излучения на рис. 2а, отсчитываемому от первой запрещенной зоны.

На наш взгляд, физический механизм, приводящий к наблюдаемым эффектам, заключается в следующем. В диапазоне первой разрешенной зоны длина волны в металлическом ФК существенно превышает период расположения элементов. Это позволяет рассматривать его как сплошной, существенно дисперсионный метадиеlectric с эффективными значениями показателя преломления, меняющимися в диапазоне от нуля вблизи плазменной частоты до единицы в высокочастотной части разрешенной зоны [17]. При возбуждении ФК конечной протяженности на этих частотах в нем, наряду с бегущими, формируются стоячие волны, обусловленные переотражениями от его границ. Если размеры ФК вдоль направления прихода излучения оказываются кратны половине длины волны в нем, в пространственном распределении интенсивности поля внутри ФК возникают характерные области локализации (фокусировки) излучения, число которых совпадает с порядковым номером пика в спектре пропускания.

ния, соответствующем разрешенной зоне. Иными словами, металлические ФК могут рассматриваться в качестве своеобразных объемных резонаторов типа Фабри–Перо, обеспечивающих высокую степень фокусировки излучения во внутренних областях своей структуры.

ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ГРАНИЦ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФК

Вышеописанные свойства металлических ФК обуславливают необычный характер отражений и преломлений волн на их границе. На рис. 3 представлены результаты численного моделирования наклонного падения волны на ФК, параметры которого соответствуют описанию к рис. 1, на частоте первой разрешенной зоны (12 ТГц). Пунктирными линиями обозначены поверхности волновых фронтов падающей и прошедшей в ФК волн.

Полученные для углов падения 35° (а) и 41° (б) картины отражения и преломления волн на границе металлического ФК позволяют сделать несколько выводов. Во-первых, из рис. 3а следует, что структура поля в пределах ФК достаточно однородна, максимумы и минимумы в его распределении связаны, очевидно, с влиянием границ ФК, отсутствуют локальные неоднородности поля, обусловленные процессами рассеяния на отдельных элементах. Сказанное подтверждает возможность описания электродинамических свойств металлических ФК как некоторой однородной проволочной среды – метадиелектрика, характеризующегося некоторыми значениями эффективной диэлектрической проницаемости. Во-вторых, несомненно, что диэлектрическая проницаемость такой проволочной среды меньше проницаемости окружающего его воздуха, т.е. в среде распространяются быстрые по отношению к окружающему пространству волны.

Подобные картины взаимодействия поля с границей проволочной среды наблюдаются для всех углов падения в диапазоне до 41° (рис. 3б). Здесь поведение прошедшего в среду поля меняется, оно приобретает затухающий по мере погружения вглубь среды характер, локализуясь вблизи границы кристалла. Таким образом, имеет место явление полного внутреннего отражения волн при падении на границу среды с меньшим показателем преломления, сопровождающееся формированием распространяющихся вдоль этой границы поверхностных волн.

Представленные результаты позволяют сделать вывод о перспективности практического использования преломляющих свойств именно металлических ФК для создания различного рода оптических систем, способных функционировать при относительно больших соотношениях между

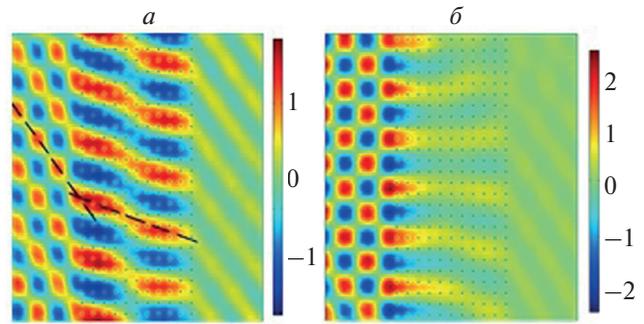


Рис. 3. Пространственные картины преломления и отражения волны при взаимодействии с границами металлического ФК при разных углах падения. Направление прихода волны – слева направо.

периодом расположения элементов в ФК и длиной волны излучения. Это связано с уникальными дисперсионными свойствами таких ФК, позволяющими достигать, в принципе, любых значений длины волны в ФК на частотах первой разрешенной зоны, а следовательно, обеспечивать сколь угодно однородный характер пространственного распределения излучения в дискретной структуре.

Одним из направлений практического применения таких ФК могут служить линзовые системы. На рис. 4а приведены результаты моделирования работы простейшей фокусирующей системы на основе металлического ФК представленной геометрии. Следует отметить хорошую степень фокусировки, достигаемой при помощи достаточно малоэлементной структуры. Однако основной практический интерес, по-видимому, могут представлять сложные линзовые системы, формируемые с помощью таких ФК, например, линзы Люнеберга, поскольку градиентное изменение показателя преломления тела линзы в этом случае достигается простым изменением периода расположения элементов в структуре ФК.

Другим примером использования необычных преломляющих свойств металлических ФК могут являться коллиматоры или, другими словами, системы, трансформирующие излучаемую локальным источником цилиндрическую волну в волну, близкую по своим свойствам к плоской (подобные системы в антенной технике могут выполнять функции поверхностей “синфазной апертуры”). Особенно эффективными такие устройства окажутся на частотах, граничных между запрещенными и разрешенными зонами, где показатель преломления метаматериала стремится к нулю. На рис. 4б представлены результаты вычислительного эксперимента, демонстрирующего возможность такого применения металлических ФК. В качестве источника поля в процессе моделирования использовалась нить линейного синфазного электрического тока, ориентированная параллельно элементам, составляющим ФК, и размещаемая в его цен-

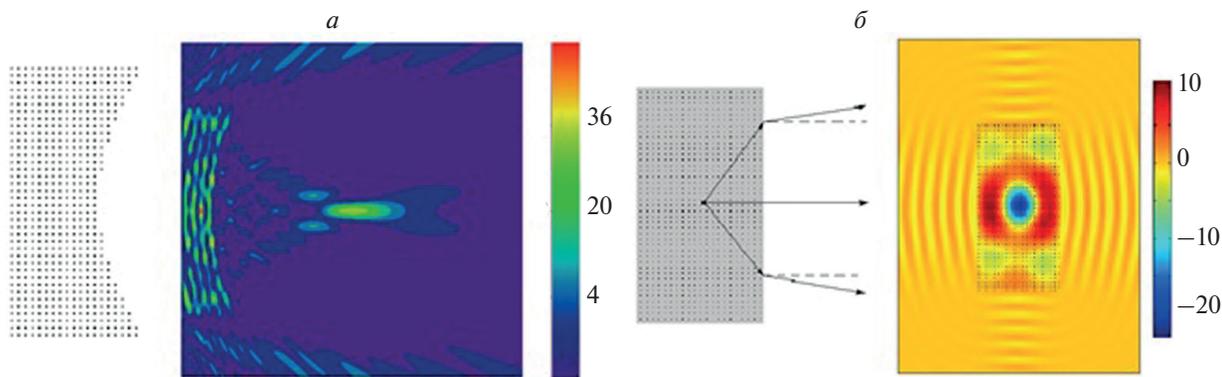


Рис. 4. Конфигурация плоско-вогнутой линзы из металлического ФК, параметры которой соответствуют описанию к рис. 1, и пространственное распределение нормированной интенсивности поля при ее возбуждении на частоте 11 ТГц (а). Концептуальная схема вычислительного эксперимента и картина пространственного распределения интенсивности излучения в коллиматоре на основе того же ФК на частоте 9.08 ТГц (б).

тре. Отметим, что наблюдаемая на рисунке “делокализация” излучения указывает на возможность и обратного преобразования — энергия падающих на ФК плоских волн может, при соответствующем выборе параметров, фокусироваться внутри структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе рассмотрен ряд подходов к созданию систем фокусировки электромагнитного излучения с использованием двумерных металлических ФК. Несмотря на различия в физических механизмах, лежащих в основе предлагаемых методов, все они приводят к значительной локализации поля в ограниченной области пространства и могут быть легко реализованы практически. Отметим, что описанные фокусирующие системы, на наш взгляд, не имеют принципиальных ограничений для использования в широкой полосе частот — начиная от радиодиапазона и вплоть до видимой части оптического спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avdeeva A. Yu., Vetrov S. Y., Timofeev I. V. // *J. Opt. Soc. Amer.* 2021. V. 38. No. 6. P. 1792.
2. Sakoda K. *Optical properties of photonic crystals.* Springer, 2005. 254 p.
3. Noda S., Fujita M., Asano T. // *Nature Photonics.* 2007. V. 1. № 8. P. 449.
4. Ветлужский А.Ю. // *Комп. иссл. и модел.* 2021. Т. 13. № 4. С. 725; Vetluzhsky A. Yu. // *Comp. Res. Model.* 2021. V. 13. No. 4. P. 725.
5. El-Kady I., Sigalas M. M., Biswas R. et al. // *Phys. Rev. B.* 2000. V. 62. No. 23. Art. No. 15299.
6. Simovski C. R., Belov P. A., Atrashchenko A. V. et al. // *Adv. Mater.* 2012. V. 24. P. 4229.
7. Pendry J. B. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 85. No. 18. P. 3966.
8. Smith D. R., Padilla W. J., Vier D. C. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. No. 18. P. 4184.
9. Parimi P. V., Lu W. T., Vodo P. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. No. 12. Art. No. 127401.
10. Guven K., Aydin K., Alici K. B. et al. // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 70. No. 20. Art. No. 205125.
11. Fabre N., Fasquel S., Legrand C. et al. // *Opto-Electron. Rev.* 2006. V. 14. P. 225.
12. Silveirinha M. G., Belov P. A., Simovski C. R. // *Phys. Rev. B.* 2007. V. 75. No. 3. Art. No. 035108.
13. Kotlyar M. I., Triandaphilov A. A., Kovalev A. A. et al. // *Appl. Optics.* 2009. V. 48. No. 19. P. 3722.
14. Nalimov A. G., Kotlyar V. V. // *J. Modern Optics.* 2017. V. 64. No. 5. P. 478.
15. Lin X., Zhang X., Chen L. et al. // *Opt. Express.* 2013. V. 21. No. 25. Art. No. 30140.
16. Gao S., Dou Y., Li Q., Jiang X. // *Opt. Express.* 2017. V. 25. No. 6. Art. No. 07112.
17. <http://jre.cplire.ru/jre/jan15/18/text.html>.

Focusing of optical radiation by metallic photonic crystals

A. Yu. Vetluzhsky*

Institute of Physical Materials Science of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047 Russia

*e-mail: vay@ipms.bscnet.ru

Methods for focusing electromagnetic waves based on the use of two-dimensional photonic crystals formed by metallic elements are considered. The physical basis for the development of methods lies in the manifestation by such photonic crystals at the frequencies of the first allowed band of the properties of a homogeneous medium with ultralow refractive index values.