

## Спектральные характеристики фотонно-кристаллической структуры с монослоем металлических наночастиц

© И.А. Глухов<sup>1,2</sup>, С.Г. Моисеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет,

432970 Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,

432071 Ульяновск, Россия

e-mail: glukhov91@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

В окончательной редакции 12.05.2023 г.

Принята к публикации 30.10.2023 г.

Показана возможность полного поглощения падающей электромагнитной волны в узкой полосе частот двумерным массивом металлических наночастиц, размещенном в поверхностном слое одномерной фотонно-кристаллической структуры. Определен характер влияния параметров массива наночастиц (форма частиц, межчастичное расстояние) на спектры отражения и поглощения фотонной структуры в области фотонной запрещенной зоны.

**Ключевые слова:** фотонно-кристаллическая структура, двумерный массив наночастиц, полное поглощение, локализованный плазмонный резонанс.

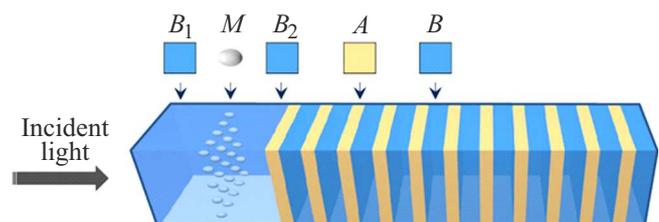
DOI: 10.61011/OS.2023.11.57014.5107-23

Фотонно-кристаллические структуры (ФКС) являются предметом интенсивных исследований на протяжении десятков лет. Благодаря периодической модуляции показателя преломления в ФКС в его спектре пропускания наблюдается фотонная запрещенная зона (ФЗЗ) — частотный интервал, в котором электромагнитные волны не могут проходить через структуру [1]. Это свойство представляет интерес для практических применений в оптике и фотонике, поскольку позволяет реализовать контроль спектральных характеристик оптического излучения в волноводных структурах. Функциональность устройств на основе ФКС значительно расширяется при использовании в её составе сред с изменяемыми характеристиками [2,3], двумерных структур [4–7] и композитных объемных материалов, электродинамические характеристики которых могут принимать значения, не встречающиеся у природных материалов [8–10].

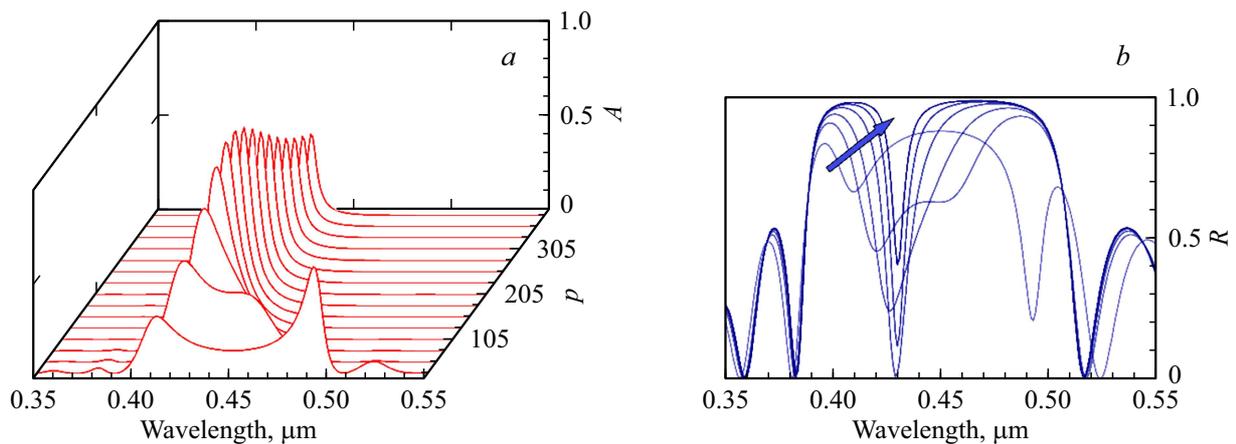
В работах [7–11] показана возможность управления модами ФКС при варьировании параметров нанокompозитных материалов и двумерных структур за счет возбуждения локализованного плазмонного резонанса в металлических наночастицах. В этих структурах высокая эффективность управления возможна благодаря сильной локализации электромагнитного поля на наночастицах (НЧ), помещенных в резонаторную область ФКС. Использование композитных сред с несферическими НЧ позволяет расширить спектральный диапазон, в котором контролируемо меняются спектральные характеристики структуры [4,5]. В настоящей работе показана возможность модификации спектральных характеристик диэлектрического ФКС в оптическом диапазоне с помощью 2D-массива (монослоя) металлических НЧ, размещенного в поверхностном слое. С помощью аналитических расче-

тов показано, что двумерный массив металлических НЧ практически полностью поглощает энергию падающего излучения на частотах вблизи частоты плазмонного резонанса, что позволяет реализовать полное подавление отражения в узкой спектральной области в пределах ФЗЗ.

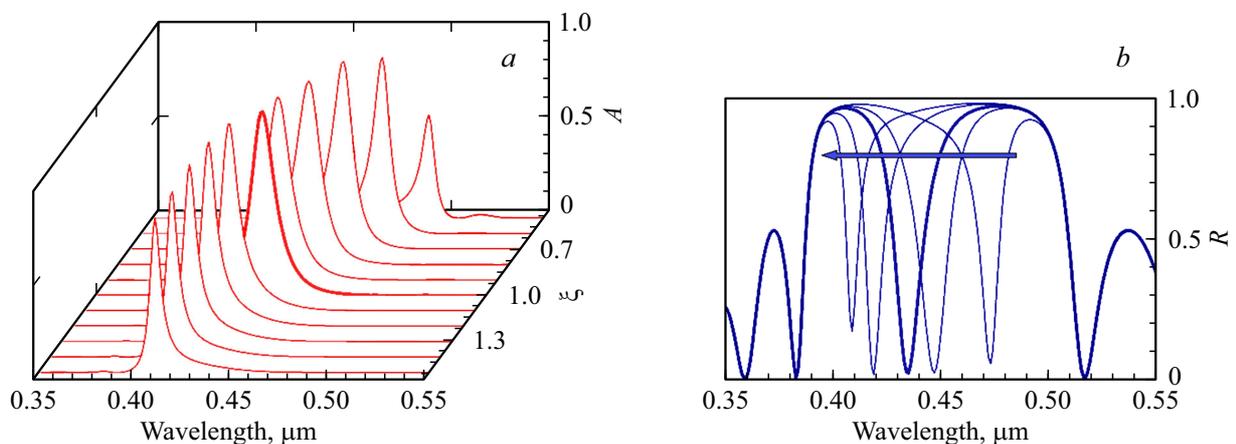
Рассмотрим ФКС, представляющую собой брэгговский отражатель с элементарной ячейкой [AB], где слои A и B выполнены из диэлектрических материалов  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  с показателями преломления  $n_A$  и  $n_B$  соответственно [12,13]. Общее количество бинарных слоев в ФКС составляет  $N = 10$ . На поверхности ФКС имеется пленка  $\text{SiO}_2$ , в которой размещен двумерный массив  $M$  серебряных НЧ [14]. Таким образом, вся фотонная структура описывается формулой  $B_1MB_2[AB]^N$ , где  $B_1$  и  $B_2$  — слои толщиной  $d_{B1}$  и  $d_{B2}$ , на которые массив НЧ разделяет поверхностный слой  $B$  (рис. 1). Толщины слоев элементарной ячейки ФКС  $d_A$  и  $d_B$  соответствуют условию брэгговского резонансного отражения на длине волны  $\lambda_0 = 4d_{An_A} = 4d_{Bn_B}$ . Толщины слоев, на которые



**Рис. 1.** Фотонная структура  $B_1MB_2[AB]^N$ . Брэгговский отражатель сформирован  $N$  бинарными слоями [AB]. Прилегающий к брэгговскому отражателю поверхностный слой диэлектрика разделен двумерным массивом НЧ  $M$  на слои  $B_1$  и  $B_2$ .



**Рис. 2.** Зависимость спектров поглощения (a) и отражения (b) фотонной структуры от длины волны  $\lambda$  падающей световой волны и межчастичного расстояния  $p$  в двумерном массиве серебряных НЧ. На рисунке (b) межчастичное расстояние принимает значения 30, 55, 105, 180, 280, 380 nm, направление возрастания  $p$  показано стрелкой. Аспектное отношение НЧ  $\xi = 1$ .



**Рис. 3.** Зависимость спектров поглощения (a) и отражения (b) фотонной структуры от длины волны  $\lambda$  падающей световой волны и аспектного отношения  $\xi$  серебряных НЧ. На рисунке (b) аспектное отношение НЧ принимает значения 0,6, 0,8, 1, 1,2, 1,5, направление возрастания  $\xi$  показано стрелкой. Межчастичное расстояние  $p = 130$  nm.

массив НЧ разделяет поверхностную пленку  $B$ , составляют  $d_{B1} = 2d_B$  и  $d_{B2} = 3d_B$ .

НЧ образуют упорядоченный двумерный массив с квадратной ячейкой. Все наночастицы имеют форму эллипсоидов вращения (сфероидов) одинакового размера, их полярная ось направлена перпендикулярно плоскости массива. Форма НЧ определяется аспектным отношением  $\xi = a/b$  длин полярной  $a$  и экваториальной  $b$  полуосей:  $\xi < 1$  соответствует сплюснутому сфероиду („диск“),  $\xi > 1$  — вытянутому сфероиду („игла“),  $\xi = 1$  — шару. Размер НЧ много меньше длины волны в среде  $B$  ( $a, b \ll \lambda_0/n_B$ ). В численных расчетах длина полярной полуоси принята равной  $a = 10$  nm.

Анализ спектральных характеристик комплексной фотонной структуры проведен с помощью численных расчетов с привлечением метода матриц переноса, в рамках которого каждому слою ФКС сопоставляется матрица, определяющая взаимосвязь полей на двух его интерфейсах [15]. Массив НЧ рассматривается как интерфейс

(слой квазиулевого толщины) с нефренелевскими коэффициентами пропускания и отражения, которому в рамках дипольного приближения сопоставляется специфическая матрица переноса [16,17]. Результирующая матрица всей фотонной структуры получается посредством последовательного произведения матриц переноса слоев ФКС и 2D-массива НЧ в соответствии с порядком их следования в направлении распространения падающей электромагнитной волны. В настоящей работе рассмотрен случай нормального падения излучения на поверхность фотонной структуры.

Из представленных на рис. 2 и 3 зависимостей видно, что при наличии двумерного массива серебряных НЧ в поверхностном слое ФКС поглощательная способность  $A$  всей структуры в относительно узком спектральном диапазоне принимает значения, близкие к 1. Полное поглощение излучения реализуется благодаря согласованию ФЗЗ, частоты плазмонного резонанса НЧ и их местоположения в поверхностном слое, обеспечи-

вающего интерференционное усиление взаимодействия и, как следствие, высокие диссипативные потери в системе „массив НЧ — брэгговский отражатель“. В области резонансного поглощения отражательная способность  $R$  структуры существенно снижена и принимает значения, близкие к 0 (рис. 2, *b* и рис. 3, *b*).

Положение полосы поглощения контролируется аспектным отношением и поверхностной концентрацией НЧ. Зависимость поглощения от межчастичного расстояния не монотонна (рис. 2): с увеличением  $p$  оно возрастает, достигает максимума ( $A \approx 1$ ) при  $p \approx 130$  nm, уменьшается при дальнейшем увеличении  $p$ . При изменении формы (аспектного отношения  $\xi$ ) НЧ наблюдается главным образом смещение полосы поглощения по ФЗЗ (рис. 3): переход от сплюснутой к вытянутой форме НЧ сопровождается сдвигом полосы поглощения в коротковолновую область спектра. Таким образом, изменение поверхностной концентрации НЧ в основном приводит к изменению величины поглощения, в то время как изменение формы частиц — к частотному сдвигу максимума кривой поглощения. Изменения амплитуды и частоты полос поглощения соответствующим образом проявляются и на спектрах отражения.

Таким образом, рассматриваемая фотонная структура может применяться в качестве частотного фильтра (на отражение) или поглотителя, спектр которого характеризуется наличием довольно широкой области отражения (шириной более 150 nm) с узкой дефектной полосой поглощения. Форма и положение полосы поглощения контролируются концентрацией и формой наночастиц, размещенных в один слой в приповерхностном слое диэлектрика. Подбором материалов ФКС и аспектного отношения наночастиц можно реализовать узкополосный поглощающий фильтр для наперед заданных частот видимой или ближней ИК (при использовании полупроводниковых материалов) областей спектра. В сочетании с другими недавно предложенными решениями (основанными на использовании жидких кристаллов или материалов, свойства которых могут управляться магнитным или электрическим полем) такая структура будет полезна при разработке сенсоров, поляризаторов и других элементов фотоники, интегральной и волоконной оптики.

### Финансирование работы

Расчет распределения интенсивности световой волны по комплексной фотонной структуре выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН). Исследование спектральных характеристик одномерных массивов несферических частиц выполнено при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-581). Расчет и анализ спектральных характеристик фотонных структур с плазмонным компонентом выполнены при поддержке гранта РНФ (проект № 23-79-30017).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

### Список литературы

- [1] K. Inoue, K. Ohtaka. *Photonic Crystals: Physics, Fabrication and Applications* (Springer-Verlag, Berlin, 2004).
- [2] V.K. Nautiyal, V. Gupta, R. Gautam. *Opt. Quantum. Electron.*, **55**, 549 (2023). DOI: 10.1007/s11082-023-04824-7
- [3] V.A. Gunyakov, M.N. Krakhalev, V.Ya. Zyryanov, V.F. Shabanov, V.A. Loiko. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **178**, 152–157 (2015). DOI: 0.1016/j.jqsrt.2015.11.018
- [4] S.G. Moiseev, I.A. Glukhov, Y.S. Dadoenkova, F.F.L. Bentivegna. *JOSA B*, **36** (6), 1645–1652 (2019). DOI: 10.1364/JOSAB.36.001645
- [5] I.A. Glukhov, Y.S. Dadoenkova, F.F.L. Bentivegna, S.G. Moiseev. *J. Appl. Phys.*, **128** (5), 053101 (2020). DOI: 10.1063/5.0008652
- [6] L. Qian, Y. Hu, Z. Chen, D. Zhao, J. Dong, X. Chen. *Crystals*, **13**, 545 (2023). DOI: 10.3390/cryst13030545
- [7] V.S. Gerasimov, A.E. Ershov, R.G. Bikbaev, I.L. Rasskazov, I.V. Timofeev, S.P. Polyutov, S.V. Karpov. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **224**, 303–308 (2019). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.028
- [8] С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников. *Квант. электрон.*, **46** (8), 743–748 (2016). [S.G. Moiseev, V.A. Ostatochnikov. *Quantum Electronics*, **46** (8), 743–748 (2016). DOI: 10.1070/QEL16086].
- [9] С.Я. Ветров, П.С. Панкин, И.В. Тимофеев. *Квант. электрон.*, **44** (9), 881–884 (2014). [S.Y. Vetrov, P.S. Pankin, I.V. Timofeev/ *Quantum Electronics*, **44** (9), 881–884 (2014). DOI: 10.1070/QE2014v044n09ABEH015473/]
- [10] Z.A. Alrowaili, M. Medhat, T.A. Taha, A. Mehaney, L.Sh. Aljoufi, H.A. Elsayed. *Opt. Quant. Electron.*, **55**, 31 (2023). DOI: 10.1007/s11082-022-04291-6
- [11] Y. Dadoenkova, I. Glukhov, S. Moiseev, V. Svetukhin, A. Zhukov, I. Zolotovskii. *Opt. Commun.*, **389**, 1–4 (2017). DOI: 10.1016/j.optcom.2016.12.017
- [12] L.V. Rodríguez-de Marcos, J.I. Larruquert, J.A. Méndez, J.A. Aznárez. *Opt. Mater. Express*, **6**, 3622–3637 (2016). DOI: 10.1364/OME.6.003622
- [13] A. Jolivet, C. Labbé, C. Frilay, O. Debieu, P. Marie, B. Horcholle, F. Lemarié, X. Portier, C. Grygiel, S. Duprey, W. Jadwisieniczak, D. Ingram, M. Upadhyay, A. David, A. Fouchet, U. Lüders, J. Cardin. *Appl. Surf. Sci.*, **608**, 155214 (2023). DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.155214
- [14] U. Kreibitz, M. Vollmer. *Optical Properties of Metal Clusters* (Springer, Berlin, 1995).
- [15] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1970). [M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (Cambridge University, Cambridge, 1999)].
- [16] C.L. Holloway, M.A. Mohamed, E.F. Kuester, A. Dienstfrey. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **47**, 853–865 (2005). DOI: 10.1109/TEMC.2005.853719
- [17] C.C. Katsidis, D.I. Siapkas. *Appl. Opt.*, **41**, 3978–3987 (2002). DOI: 10.1364/AO.41.003978