

# Селективное усиление дефектных мод мультидефектного фотонного кристалла

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

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

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

e-mail: glukhov91@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024 г.

В окончательной редакции 29.06.2024 г.

Принята к публикации 30.10.2024 г.

Исследованы спектральные характеристики одномерных фотонно-кристаллических структур, образованных последовательной комбинацией брэгговских отражателей и слоев диэлектрика. Обнаружено формирование в области фотонной запрещенной зоны одной или нескольких гребенок спектральных линий дефектных мод. Особенности распределения оптического излучения по дефектной фотонной структуре позволяют реализовать селективное усиление дефектных мод.

**Ключевые слова:** дефектная фотонно-кристаллическая структура, дефектные моды, локализация излучения, селективное усиление.

DOI: 10.61011/OS.2024.11.59502.6427-24

## Введение

В спектре пропускания диэлектрических слоисто-периодических структур с определенным образом согласованной толщиной слоев, известных также как фотонные кристаллы, имеются фотонные запрещенные зоны (ФЗЗ) — интервалы частот, в которых отсутствует пропускание при высоком коэффициенте отражения. В ФЗЗ также могут быть сформированы одна или несколько относительно узких спектральных полос пропускания (подавленного отражения) вследствие нарушения строгой периодичности оптической длины пути в слоях структуры [1]. Такие „дефектные“ слои могут иметь толщину или показатель преломления, отличающиеся от слоев фотонного кристалла. Моды, связанные с наличием дефектных слоев в структуре фотонного кристалла, также называются „дефектными“ [2–4]. Для управления количеством и частотами дефектных мод используются различные материалы и метаструктуры (жидкокристаллические материалы, нанокompозитные материалы, двумерные структуры, графен и др. [5–8]), а также фотонные структуры различной топологии [8–11]. Особенности спектральных характеристик дефектных фотонных кристаллов используются для разработки отражателей, фильтров, мультиплексоров и других устройств фотоники и оптоэлектроники [12].

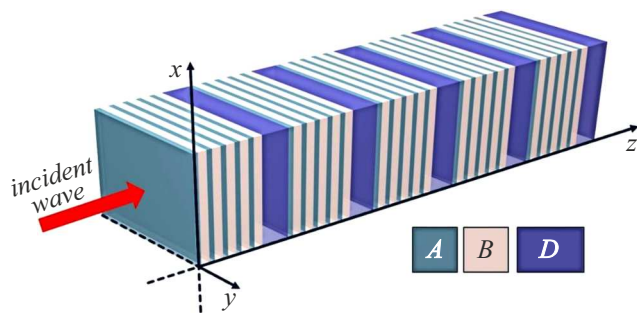
В настоящей работе предложен дизайн одномерной фотонно-кристаллической структуры, в области ФЗЗ которой имеется одна или несколько групп спектральных линий пропускания (спектральных гребенок), связанных с дефектными модами. Такая структура представляет собой мультидефектный фотонный кристалл (МДФК) — распределенный брэгговский отражатель, разделенный на части (домены) несколькими дефектными слоями.

## 1. Дизайн дефектной структуры. Гребенки спектральных линий дефектных мод в ФЗЗ

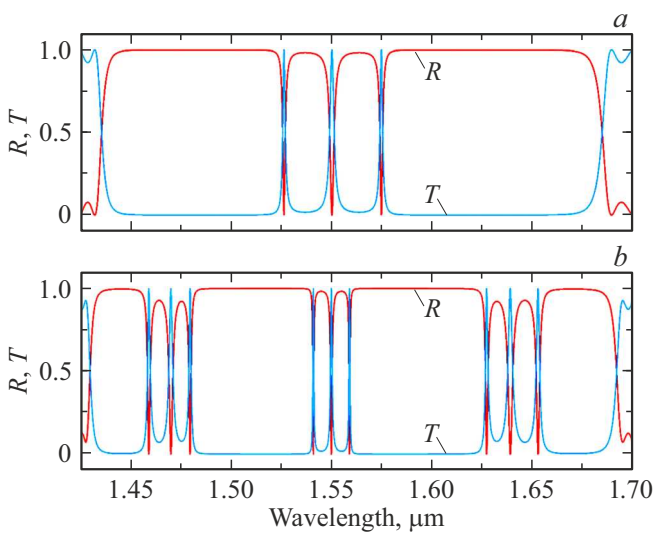
Рассмотрим МДФК, построенный на основе брэгговского отражателя с элементарной ячейкой  $[AB]$ , где слои  $A$  и  $B$  выполнены из диэлектрических материалов с показателями преломления  $n_A$  и  $n_B$  соответственно. Этот диэлектрический отражатель разделен слоями  $D_1, D_2, \dots, D_{M-1}$  на  $M$  идентичных доменов  $[AB]^N$  с числом бинарных слоев  $N$  в каждом из них. Слоистая фотонная структура завершается дополнительным дефектным слоем  $D_M$ . Материалы дефектных слоев  $D_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ) характеризуются одинаковыми показателями преломления  $n_D$ . Таким образом, последовательность диэлектрических слоев МДФК описывается формулой  $[[AB]^N D]^M$ . Дизайн МДФК представлен на рис. 1. Рассматривается случай, когда МДФК погружен в однородную непоглощающую среду (воздух) и световая волна падает нормально на МДФК со стороны поверхностного слоя  $A$ .

Для расчета спектральных характеристик слоисто-периодической структуры используется метод матриц переноса [13]. Для усиливающих слоев аналитические выражения для комплексных коэффициентов отражения и пропускания приведены в монографии [14]. Матрица переноса для всей структуры формируется последовательным перемножением матриц интерфейсов и матриц переноса через слои материала.

Все расчеты в настоящей работе проведены для следующих фиксированных параметров:  $n_A = 3.35$  (GaAs),  $n_B = 2.89$  (AlAs) [15],  $N = 10$ , толщины  $d_A$  и  $d_B$  слоев  $A$  и  $B$  соответствуют условию брэгговского резонансного отражения на вакуумной длине волны  $\lambda_{Br} = 1.55 \mu\text{m}$ :



**Рис. 1.** Геометрия задачи: МДФК имеет структурную формулу  $[[AB]^N D]^M$ , где  $[AB]^N$  — брэгговские отражатели (домены), выполненные из слоев A и B,  $N$  — число периодов  $[AB]$  в доменах,  $D$  — дефектные слои,  $M$  — число доменов (совпадает с числом дефектных слоев). Световая волна падает на МДФК со стороны слоя A.



**Рис. 2.** Спектры пропускания (синие кривые) и отражения (красные кривые) МДФК с числом доменов  $M = 4$  для различной толщины дефектных слоев:  $d_D = d_A$  (a),  $23d_A$  (b).

$d_{A_n} = d_{B_n} = \lambda_{Br}/4$ . Ниже рассматривается также случай МДФК с одним усиливающим дефектом, оптические характеристики которого определяются комплексным показателем преломления  $\tilde{n}_D = n_D + ik_D$ , где  $n_D = 3.35$  и  $k_D = -10^{-3}$ .

На рис. 2 представлены спектры пропускания и отражения МДФК с одинаковым числом доменов ( $M = 4$ ) и дефектными слоями разной толщины ( $d_D = d_A$  и  $d_D = 23d_A$ ). Можно видеть, что в отличие от случая фотонного кристалла с единственным дефектным слоем, в ФЗЗ которого формируются отдельные спектральные линии пропускания, в спектре пропускания МДФК спектральные линии дефектных мод сгруппированы в гребенки. Число линий пропускания в каждой спектральной гребенке определяется числом доменов и составляет величину, равную  $M - 1$ . В частности, в случае, показанном на рис. 2, для  $M = 4$  число линий

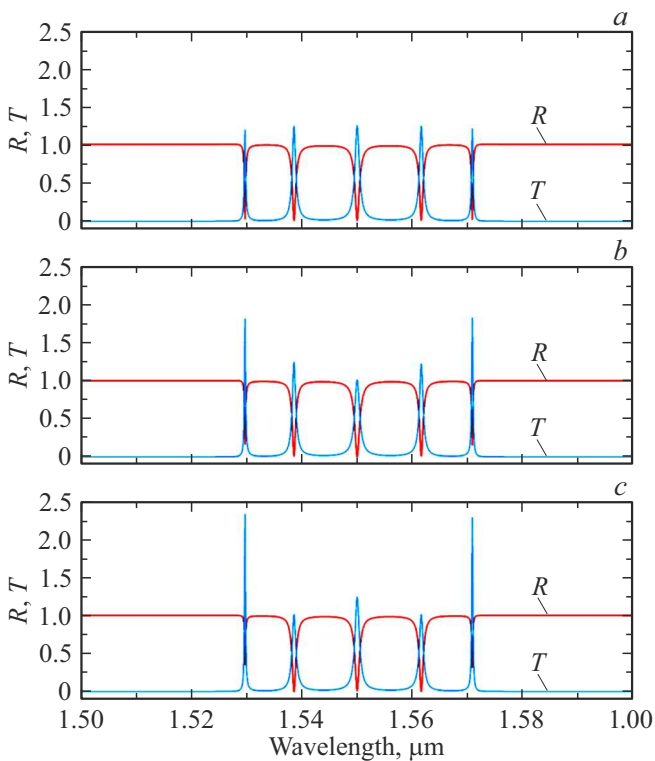
в каждой гребенке равно 3. Количество спектральных гребенок в ФЗЗ МДФК возрастает с увеличением  $d_D$ : для  $d_D = d_A$  наблюдается одна гребенка (рис. 2, a), а для  $d_D = 23d_A$  — три гребенки (рис. 2, b).

Из рис. 2 также видно, что спектральная ширина и расстояние между спектральными линиями дефектных мод в гребенке уменьшаются с увеличением общего числа дефектных мод. К аналогичному эффекту приводит увеличение числа элементарных ячеек  $N$  в доменах (на рис. 2 не показано).

На частотах, отвечающих дефектным модам, световая волна локализуется в области дефектных слоев МДФК. Однако для разных дефектных мод локализация оптического поля может наблюдаться в различных слоях структуры. Анализ распределения поля по МДФК показывает, что на частотах крайних мод гребенки областями локализации световых волн являются все дефектные слои (за исключением внешнего слоя DM), в то время как для внутренних мод интенсивность излучения может существенно различаться в разных дефектных слоях. В частности, для МДФК с шестью доменами ( $M = 6$ ) центральная дефектная мода (на длине волны  $1.55 \mu\text{m}$ ) локализуется на первом, третьем и пятом дефектных слоях, а соседние с ней дефектные моды (вблизи длин волн  $1.54$  и  $1.56 \mu\text{m}$ ) — преимущественно на первом, втором, четвертом и пятом дефектных слоях (здесь и далее нумерация дефектных слоев ведется в направлении распространения световой волны).

Отличие в характере локализации оптического излучения на разных дефектных модах открывает возможность селективного управления излучением на разных частотах. Для этого следует разместить в дефектных слоях некую среду, выполняющую роль, например, поляризатора, поглотителя и др. Ниже продемонстрирована возможность избирательного усиления дефектных мод за счет применения усиливающей среды в качестве материала дефектного слоя (оптические характеристики усиливающего материала приведены выше).

Спектры пропускания и отражения МДФК с шестью доменами ( $M = 6$ ), в составе которого один из дефектных слоев выполнен из усиливающего материала, представлены на рис. 3. Наличие усиливающего слоя МДФК приводит к увеличению энергетических коэффициентов отражения и пропускания на частотах дефектных мод. В соответствии с отмеченными выше особенностями локализации поля на дефектах структуры наличие усиления в первом дефектном слое приводит к усилению всех дефектных мод (рис. 3, a), во втором дефектном слое — боковых дефектных мод (рис. 3, b), в третьем (центральной) дефектном слое — крайних и в меньшей степени центральной дефектной моды (рис. 3, c). При наличии усиления в четвертом или пятом дефектных слоях спектральная картина оказывается практически идентичной случаю усиления соответственно во втором и первом дефектных слоях. Если усиливающим является последний (шестой) дефектный слой, то наблюдается усиление всех дефектных мод в гребенках,



**Рис. 3.** Спектры пропускания (синие кривые) и отражения (красные кривые) МДФК с усилением в первом (а), втором (b), третьем (c) дефектных слоях. Параметры структуры: число доменов  $M = 6$ , толщина дефектных слоев  $d_D = d_A$ . Остальные параметры те же, что и на рис. 2.

однако уровень этого усиления самый низкий, поскольку этот дефект находится вне резонаторов, образованных доменами МДФК.

## 2. Заключение

Дефектные структуры с гребенчатым спектром пропускания на фоне широкой ФЗЗ могут представлять интерес с точки зрения разработки дизайна многоканальных резонаторных и лазерных структур, сенсоров, оптических фильтров. Общее число и положение спектральных гребенок, а также отдельных спектральных линий дефектных мод в спектре МДФК определяется толщиной дефектных слоев, количеством доменов (брегговских отражателей) и числом элементарных ячеек в них. Неоднородный характер распределения поля дефектных мод по МДФК позволяет избирательно подавлять или усиливать отражение и пропускание в узких спектральных полосах в запрещенной области спектра.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-30017).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] K. Sakoda. *Optical Properties of Photonic Crystals. Springer Series in Optical Sciences* (Springer, Berlin, 2005).
- [2] S.M. Jeong, N.Y. Ha, Y. Takahashi, K. Ishikawa, H. Takezoe, S. Nishimura, G. Suzuki. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 261108 (2007). DOI: 10.1063/1.2752017
- [3] С.В. Елисеева, Д.И. Семенов. *Опт. и спектр.*, **109** (5), 790–798 (2010). [S.V. Eliseeva, D.I. Sementsov. *Opt. Spectrosc.*, **109** (5), 729–737 (2010). DOI: 10.1134/S0030400X10110123].
- [4] С.Г. Моисеев, В.А. Остаточников. *Квант. электрон.*, **46** (8), 743–748 (2016). [S.G. Moiseev, V.A. Ostatochnikov. *Quant. Electron.*, **46** (8), 743–748 (2016). DOI: 10.1070/QEL16086].
- [5] S.G. Moiseev, I.A. Glukhov, V.A. Ostatochnikov, A.P. Anzulevich, S.N. Anzulevich. *J. Appl. Spectrosc.*, **85** (3), 511–516, (2018). DOI: 10.1007/s10812-018-0681-x
- [6] V.S. Gerasimov, A.E. Ershov, R.G. Bikbaev, I.L. Rasskazov, I.V. Timofeev, S.P. Polyutov, S.V. Karpov. *JQSRT*, **224**, 303–308 (2019). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.028
- [7] F. Wu, M. Chen, S. Xiao. *Opt. Lett.*, **47**, 2153–2156 (2022). DOI: 10.1364/OL.455910
- [8] F.S. Saeidi, M. Moradi. *Opt. Commun.*, **493**, 126999 (2021). DOI: 10.1016/j.optcom.2021.126999
- [9] M. Renilkumar, P. Nair. *Opt. Mater.*, **33** (6), 853–858 (2011). DOI: 10.1016/j.optmat.2011.01.008
- [10] I.S. Panyayev, G. Sannikov, Y.S. Dadoenkova, N.N. Dadoenkova. *IEEE Sens. J.*, **22** (23), 22428–22437 (2022). DOI: 10.1109/JSEN.2022.3217117
- [11] И.А. Глухов, С.Г. Моисеев. *Опт. и спектр.*, **11**, 1475–1478 (2023). DOI: 10.61011/OS.2023.11.57005.5095-23
- [12] Q. Gong, X. Hu. *Photonic Crystals: Principles and Applications* (Jenny Stanford Publishing, 2014).
- [13] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М., 1970). [M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (Cambridge University, Cambridge, 1999)].
- [14] Б.Б. Бойко, Н.С. Петров. *Отражение света от усиливающих и нелинейных сред* (Минск, Наука и Техника, 1988).
- [15] A.D. Rakić, M.L. Majewski. *J. Appl. Phys.*, **80**, 5909–5914 (1996). DOI: 10.1063/1.363586