

## ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

## Исследование свойств запрещенной зоны одномерных тернарных фотонных кристаллов с одним дефектным слоем

Ру-Йи Танг, Джиан-Вей Ву, Бикаш Накарми

*Представлены одномерные тернарные фотонные кристаллы, содержащие один дефектный слой. Свойства запрещенных зон, включая их ширину и дефектную моду, проанализированы путем изменения толщины и положения дефектного слоя, числа повторений элементарной ячейки фотонного кристалла и начального угла падения. Результаты показывают, что толщина дефектного слоя может сильно влиять на коэффициент пропускания и число дефектных мод. Дефектная мода может исчезнуть при увеличении числа периодических слоев. Положение дефектного слоя в фотонном кристалле влияет на длину волны и коэффициент пропускания дефектной моды. Кроме того, ширина зоны и свойства дефектной моды TE и TM волн сильно зависят от угла падения.*

**Ключевые слова:** одномерный фотонный кристалл, метод матриц передачи, запрещенная зона, дефектная мода.

## 1. Введение

В течение последних трех десятилетий фотонные кристаллы (ФК), представляющие собой искусственные диэлектрические или металлические структуры, показатель преломления которых периодически изменяется в пространстве, являются предметом интенсивного изучения для целого ряда научных групп [1–6]. ФК можно подразделить на одномерные, двумерные и трехмерные периодические структуры, среди которых большой интерес вызывают одномерные (1D) ФК благодаря простоте конфигурации и теоретического моделирования. К настоящему времени широко представлены в оптике 1D ФК продемонстрировали большие возможности во многих приложениях, таких как оптическое переключение [7, 8], лазеры с низким порогом генерации [9, 10], всенаправленные отражатели [11], перестраиваемые фильтры [12–14] и т. д. Анализ литературы показывает, что в устройствах на базе 1D ФК используются два важнейших свойства последних: фотонные запрещенные зоны и дефектные моды.

Запрещенные зоны возникают из-за интерференции волн, испытывающих брэгговское рассеяние на идеальной периодической решетке, в результате чего излучение некоторых частот не может распространяться через ФК [15]. Однако в действительности ФК не идеальны. Де-

фектные слои, параллельные слоям периодической структуры, но отличающиеся от них, порождают дефектные моды, которые наблюдаются на фоне запрещенных зон [16]. Дефектные зоны, обусловленные дефектными слоями в ФК, имеют богатый набор потенциальных приложений. Поэтому представляет большой интерес исследовать отражательные характеристики запрещенных зон 1D ФК, содержащих примесные слои. Конечно, и запрещенные зоны, и дефектные моды подробно обсуждались многими авторами [17–21] в случае бинарных одномерных ФК. Однако 1D ФК, состоящие из трех материалов и более, требуют большего внимания в силу наличия некоторых важных специфических свойств по сравнению с бинарными структурами.

В настоящей работе представлены одномерные тернарные фотонные кристаллы с одним дефектным слоем, для которых теоретически исследована зависимость свойств запрещенных зон и дефектных мод от таких параметров, как число основных слоев периодической структуры, положение и толщина дефектного слоя, угол падения света. Некоторые результаты этих исследований приведены в разд.3.

## 2. Теория

Схема одномерного тернарного фотонного кристалла с одним дефектным слоем  $((ABC)^N ABCD (ABC)^N)$  показана на рис.1, где дефектный слой  $D$  нарушает совершенную периодическую структуру. Пленки из материалов  $A$ ,  $B$  и  $C$  образуют базовую структурную единицу, регулярно повторяющуюся вдоль определенного направления. Как видно из рис.1, в рассматриваемом случае число повторений равно  $2N + 1$  и дефектный слой находится в средней секции 1D ФК. В ходе настоящего исследования он будет сдвигаться в положения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ . Очевидно, что, если оптические волны различной частоты вводятся в левый порт представленного устройства, они могут быть отражены или пропущены в зависимости от фотонной запрещенной зоны, дефектной моды и начального угла па-

\* Перевод с англ. В.Л. Дербова.

**Ru-Yi Tang.** College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P.R. China

**Jian-Wei Wu.** College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P.R. China; State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, P.R. China; School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305714, Republic of Korea; e-mail: jwwu@kaist.ac.kr

**Bikash Nakarmi.** School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305714, Republic of Korea

Поступила в редакцию 23 сентября 2015 г., после доработки – 30 марта 2016 г.

дения. В общем случае эффективным методом описания прохождения волн через 1D ФК является метод матриц передачи, в котором каждому слою соответствует матрица [21]

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -(i/\eta_j) \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где индекс  $j$  – номер диэлектрического слоя;  $\delta_j = (2\pi/\lambda) \times n_j h_j \cos \theta$  – фаза;  $\eta_j = n_j \cos \theta$  (для ТЕ волны) или  $\eta_j = (\cos \theta)/n_j$  (для ТМ волны);  $\lambda$  – длина волны падающего света;  $n$  – показатель преломления;  $h$  и  $\theta$  – толщина слоя и угол падения для каждого слоя соответственно. Если весь ФК находится в воздухе, то  $\theta_0$  – начальный угол падения на ФК, и для каждого слоя среды соответствующая тригонометрическая функция дается выражением

$$\cos \theta = \cos \theta_i = \sqrt{1 - (\sin^2 \theta_0)/n_i^2}, \quad \text{где } i = A, B, C, D. \quad (2)$$

Матрица передачи  $M_0$  для каждой тройки слоев  $ABC$  имеет вид

$$M_0 = M_A M_B M_C. \quad (3)$$

Если дефектный слой находится в положении  $P_4$ , полная матрица передачи  $M$  фотонного кристалла с дефектным слоем определяется как

$$M = (M_0)^N M_A M_B M_C M_D (M_0)^N = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $M_D$  – матрица передачи дефектного слоя. Для других случаев, показанных на рис.1, матрица передачи  $M$  имеет вид, аналогичный (4), в котором матрица  $M_D$  сдвинута в положение, соответствующее рассматриваемому случаю.

Коэффициент отражения ФК выражается через элементы матрицы (4) следующим образом:

$$r = \frac{(M_{11} + M_{12}\eta_{out})\eta_{in} - (M_{21} + M_{22}\eta_{out})}{(M_{11} + M_{12}\eta_{out})\eta_{in} + (M_{21} + M_{22}\eta_{out})}, \quad (5)$$

где  $\eta_{in} = \eta_{out} = \cos \theta_0$ , поскольку ФК находится в воздухе. Соответствующий коэффициент отражения по мощности

$$R = |r|^2. \quad (6)$$

На основе приведенных теоретических формул можно продемонстрировать и исследовать запрещенную зону и дефектную моду для 1D ФК с одним дефектным слоем в зависимости от таких параметров, как число повторений  $N$ , толщина и положение дефектного слоя, начальный угол падения.

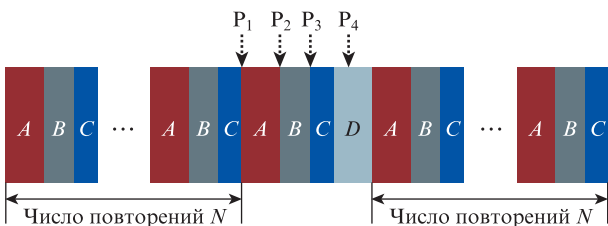


Рис.1. Схема одномерного тернарного фотонного кристалла, содержащего дефектный слой.

### 3. Результаты и их обсуждение

Меняя толщину дефектного слоя  $h_d$ , получаем фотонные запрещенные зоны (рис.2). При моделировании полагалось, что  $N = 10$ , показатели преломления материалов  $A, B, C$  и  $D$   $n_a = 1.5, n_b = 2, n_c = 2.5, n_d = 2.3$ , а толщины слоев  $h_a = 100$  нм,  $h_b = 75$  нм и  $h_c = 60$  нм. Поскольку толщина дефектного слоя мала (10 нм), влиянием дефектного слоя на фотонную запрещенную зону можно пренебречь. В результате на рис.2,а видна сплошная запрещенная зона шириной  $\sim 250$  нм, причем полоса отражения заметно уширена, наблюдается также сдвиг центральной длины волны в красную сторону по сравнению с обычными одномерными бинарными фотонными кристаллами. В случае  $h_d = 50$  нм (рис.2,б) в запрещенной зоне появляется дефектная мода, которая с увеличением  $h_d$  до 150 нм сдвигается в длинноволновую сторону (рис.2,в). Интересное явление наблюдается на рис.2,г, где при  $h_d = 220$  нм дефектная мода снова смещается в сторону меньших длин волн. Следовательно, можно заключить, что при изменении толщины дефектного слоя от 10 до 220 нм длина волны узкополосной дефектной моды сильно зависит от  $h_d$ . При увеличении  $h_d$  от 800 до 2000 нм (другие параметры те же, что на рис.1) наблюдаются удивительные результаты с дефектными модами (рис.3). В случае  $h_d = 800$  нм (рис.3,а) видны две резкие дефектные моды, причем при увеличении  $h_d$  до 1200 нм (рис.3,б) расстояние между их длинами волн уменьшается. С ростом толщины дефектного слоя от 1600 до 2000 нм число дефектных мод увеличивается (рис.3,в и г) и спектральные интервалы между ними постепенно сжимаются. В действительности проявляющиеся дефектные моды являются прямым результатом осцилляций в дефектном слое, поэтому один дефектный слой с увеличением толщины может приводить к большему числу дефектных мод. Этот результат заслуживает особого внимания, т. к. увеличенное число дефектных мод важно для таких приложений, как многоканальные фильтры.

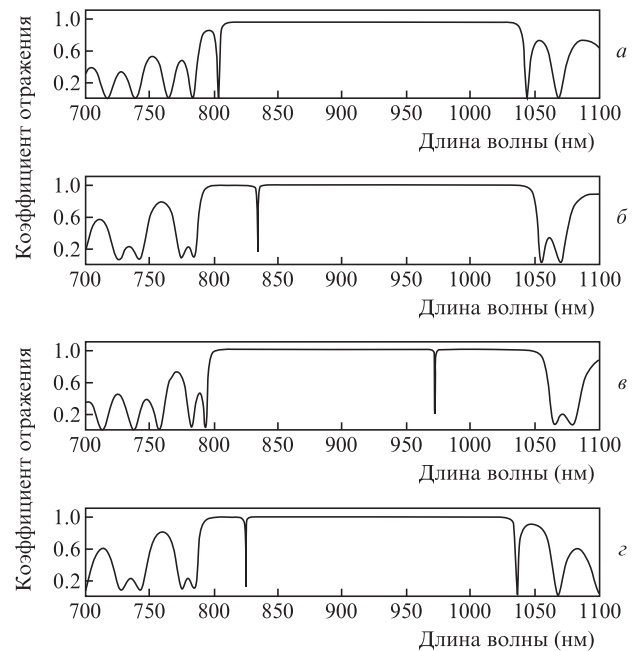


Рис.2. Фотонная запрещенная зона при толщине находящегося в положении  $P_4$  дефектного слоя  $h_d = 10$  (а), 50 (б), 150 (в) и 220 нм (г);  $N = 10$ .

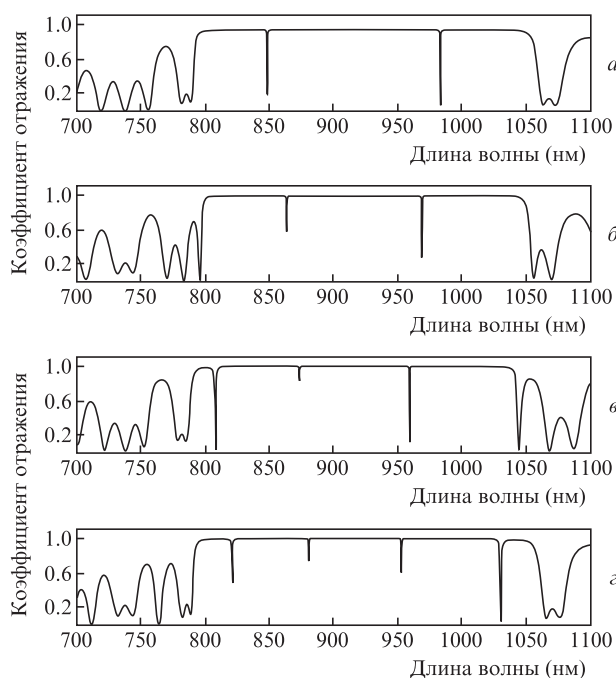


Рис.3. Фотонная запрещенная зона при толщине дефектного слоя в положениях  $P_4$   $h_d = 800$  (а), 1200 (б), 1600 (в) и 2000 нм (г);  $N = 10$ .

Изучим теперь влияние изменения числа повторений  $N$  основного элемента структуры ФК на зависимость  $R(\lambda)$  при фиксированной толщине дефектного слоя. Для дефектного слоя толщиной 300 нм запрещенные зоны, отвечающие разному числу повторений  $N$ , представлены на рис.4. С увеличением  $N$  дефектная мода в запрещенной зоне постепенно пропадает. В случае  $N = 5$  наблюдается дефектная мода с высоким коэффициентом пропускания и большой шириной полосы, т.е. дефектный слой оказывает важное влияние на фотонную запрещенную зону.

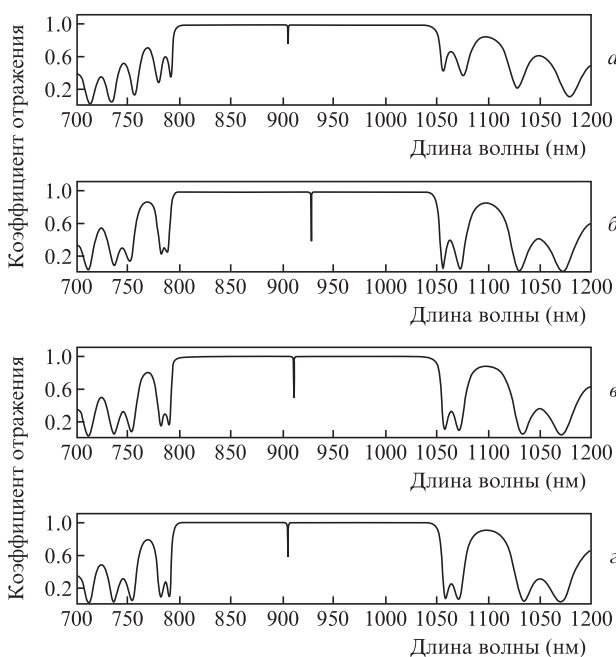


Рис.4. Фотонная запрещенная зона при толщине дефектного слоя в положении  $P_4$   $h_d = 300$  нм и числе повторений  $N = 5$  (а), 10 (б), 11 (в) и 15 (г).

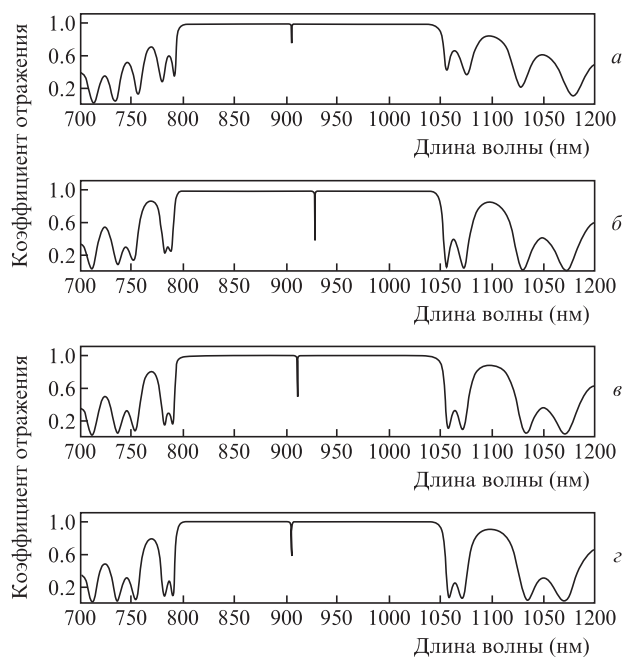


Рис.5. Фотонная запрещенная зона при помещении дефектного слоя в положения  $P_1$  (а),  $P_2$  (б),  $P_3$  (в) и  $P_4$  (г);  $N = 10$ ,  $h_d = 300$  нм.

При  $N = 10$  и  $N = 11$  толщина дефектного слоя очень мала по сравнению с полной протяженностью фотонного кристалла и, как следствие, коэффициент пропускания дефектной моды быстро уменьшается, а полоса заметно сужается. При  $N = 15$  влиянием дефектной моды на полосу отражения, связанную с фотонной запрещенной зоной, можно пренебречь, и на рис.4,г видна сплошная запрещенная зона шириной  $\sim 250$  нм. Заслуживает внимания то, что положение дефектной моды может не меняться при изменении числа повторений, поэтому для перестройки положения и ширины дефектной моды нужно разумно выбирать соответствующее число повторений и толщину дефектного слоя.

Изменение зависимости  $R(\lambda)$  фотонных запрещенных зон и дефектных мод при помещении дефектного слоя в положения  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  показаны на рис.5 при  $N = 10$  и  $h_d = 300$  нм. Видно, что как положение, так и коэффициент пропускания дефектной моды немного изменяется при различных положениях дефектного слоя (см. рис.1). Заметим, что дефектная мода может исчезнуть, если помещать дефектный слой в положения, отличные от перечисленных в настоящей работе.

Следующий параметр – начальный угол падения на фотонный кристалл – играет важную роль для ТЕ и ТМ волн в условиях наклонного падения. Поведение фотонных запрещенных зон и дефектных мод для ТЕ и ТМ волн показано на рис.6 при изменении угла падения от 0 до  $85^\circ$ . Оптическая длина пути в каждом слое уменьшается с ростом угла падения, в результате чего полоса отражения, соответствующая фотонной запрещенной зоне, и дефектная мода всегда сдвигаются в сторону более коротких волн. Различие между ТЕ и ТМ волнами заключается в том, что для ТЕ волны ширина фотонной запрещенной зоны слегка увеличивается, а для ТМ волны – заметно сужается по мере того, как угол падения растет от 0 до  $85^\circ$ . Однако тенденция роста дефектной моды с увеличением угла падения одинакова для ТЕ и ТМ волн. При  $\theta_0 = 85^\circ$

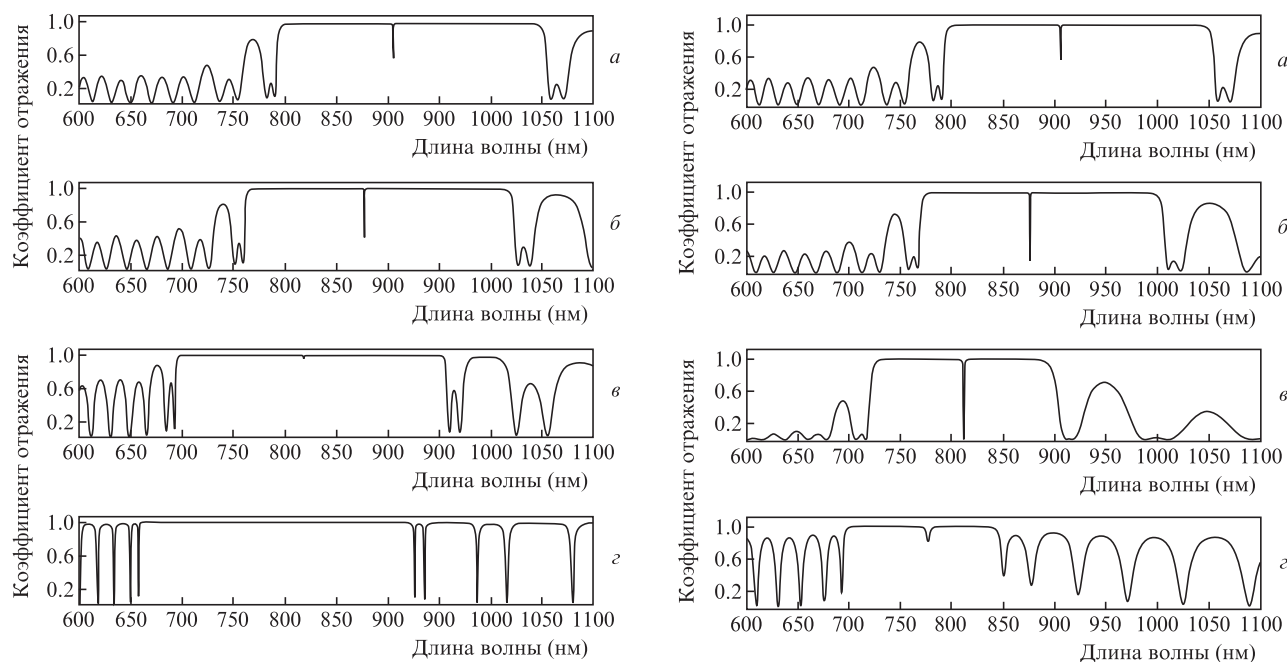


Рис.6. Фотонная запрещенная зона (дефектный слой в положении  $P_4$ ) для ТЕ волны (слева) и ТМ волны (справа) при углах падения  $\theta_0 = 0$  (а),  $30^\circ$  (б),  $60^\circ$  (в) и  $85^\circ$  (г);  $N = 10$ ,  $h_d = 300$  нм.

дефектные моды для ТЕ и ТМ волн сильно подавляются и уширяются по сравнению со случаями нормального падения. Следовательно, дефектная мода с высоким коэффициентом и узкой полосой пропускания может быть реализована за счет изменения начального угла падения волн.

#### 4. Заключение

В работе представлена и численно проанализирована одномерная тернарная структура фотонного кристалла  $(ABC)^N ABCD (ABC)^N$  с одним дефектным слоем. Детально обсуждены как фотонная запрещенная зона, так и дефектные моды пропускания на ее фоне в условиях изменения таких параметров, как толщина дефектного слоя, число повторений, локализация дефекта и начальный угол падения, при разумном выборе которых нужным образом можно формировать запрещенную зону и дефектные моды. Представленная структура может найти применение в оптических переключателях, фильтрах и лазерных технологиях.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (грант №61205111), Программой научно-технологических исследований Комиссии по образованию муниципалитета Чунцин (грант №KJ130633), Открытым фондом Государственной ведущей лаборатории миллиметровых волн (грант №K201513), Открытым фондом Государственной ведущей лаборатории передовых оптических систем связи и сетей (Китай) и Западным проектом Стипендиального совета Китая (грант №201408505054).

- Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N., Meade R.D. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton: University Press, 2008).
- Lončar M., Doll T., Vučković J., Scherer A. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **18** (10), 1402 (2000).
- Кузнецова Т.И., Распопов Н.А. *Квантовая электроника*, **45** (11), 1055 (2015).
- Gao Y.H., Xu X.S. *Chin. Phys. B*, **23** (11), 114205-1-5 (2014).
- Yablonovitch E. *J. Phys.: Condens. Matter.*, **5**, 2443 (1993).
- Mohebbi Z., Nozhat N., Emami F. *Opt. Commun.*, **355**, 130 (2015).
- Chang K.D., Liu C.Y. *Opt. Commun.*, **316**, 10 (2014).
- Beggs D.M., White T.P., O'Faolain L., Krauss T.F. *Opt. Lett.*, **33** (2), 147 (2008).
- Loncar M., Yoshie T., Scherer A., Gogna P., Qiu Y. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (5), 2680 (2002).
- Nomura M., Lwamoto S., Kumagai N., Arakawa Y. *Phys. E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **40** (6), 1800 (2008).
- Bruyant A., Lerondel G., Reece P.J., Gal M. *Appl. Phys. Lett.*, **82** (19), 3227 (2003).
- Qiu M., Mulot M., Swillo M., Anand S., Jaskorzynska B., Karlsson A., Kamp M., Forchel A. *Appl. Phys. Lett.*, **83** (25), 5121 (2003).
- Costa R., Melloni A., Martinelli M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15** (3), 401 (2003).
- Cos J., Ferre-Borrull J., Pallares J., Marsal L.F. *Opt. Commun.*, **282** (6), 1220 (2009).
- Nusinsky I., Hardy A.A. *Phys. Rev. B*, **73**, 125104-1-9 (2006).
- King T.C., Wu C.J. *Phys. E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **69**, 39 (2015).
- Li X., Xie K., Jiang H.M. *Opt. Commun.*, **282** (21), 4292 (2009).
- Wu C.J., Wang Z.H. *Prog. Electromagn. Res.*, **103**, 169 (2010).
- Fan H.M., Wang T.B., Liu N.H., Liu J.T., Liao Q.H., Yu T.B. *J. Opt.*, **16**, 125005-1-6 (2014).
- Lu Y.H., Huang M.D., Park S.Y., Kim P.J., Lee Y.P. *J. Korean Phys. Soc.*, **51** (4), 1550 (2007).
- Born M., Wolf E. *Principle of Optics* (Cambridge: University Press, 2013).