

07

## О резонансных свойствах двумерных фотонных кристаллов

© А.Ю. Ветлужский

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, Улан-Удэ

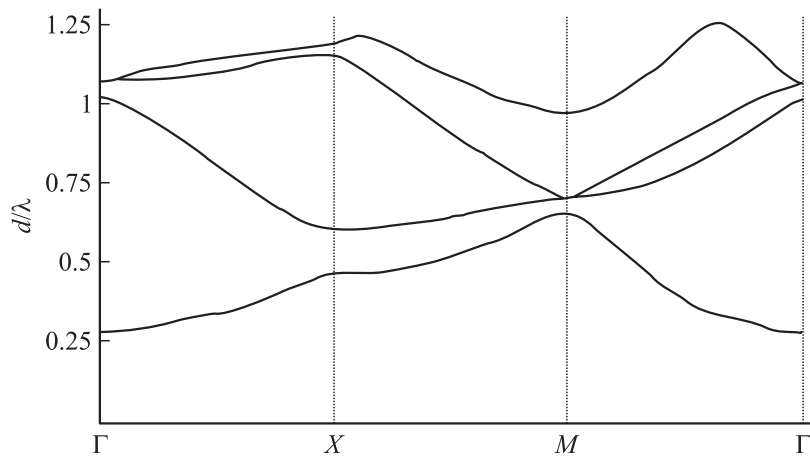
E-mail: vay@pres.bscnet.ru

Поступило в Редакцию 15 января 2010 г.

Теоретически исследуются резонансные свойства двумерных фотонных кристаллов, проявляющиеся в локализации излучения внутри таких объектов на частотах, соответствующих границам запрещенных зон. Приводятся результаты сравнения данного эффекта с резонансами в фотонных кристаллах с нарушениями внутренней структуры, связанных с возникновением в них дефектных мод.

Фотонные кристаллы (ФК) — периодически структурированные среды, основным свойством которых является наличие запрещенных зон, т.е. диапазонов частот, и в которых полностью подавляется распространение электромагнитных волн через структуру, — привлекают внимание исследователей в течение уже двух десятков лет в связи с возможностью их разнообразных практических приложений [1–3]. Несмотря на уникальные свойства трехмерных ФК, наиболее перспективными для практического применения в ближайшие годы принято считать [4] двумерные ФК, обладающие пространственной периодичностью в двух ортогональных направлениях. Такие структуры просты в реализации, но при этом позволяют создавать весьма эффективные устройства преобразования и канализации электромагнитного излучения различных диапазонов.

Примером могут служить ФК с дефектами структуры. Введение дефекта в ФК приводит к появлению дефектных мод в запрещенной зоне, в результате чего возникают новые эффекты во взаимодействии излучения с ФК [5,6]. Одним из наиболее интересных является локализация поля в дефектных модах, в результате чего цепочка дефектов может функционировать как волноводный канал [7], а одиночные дефекты — в качестве объемных резонаторов [8].



**Рис. 1.** Дисперсионные зависимости для ФК из металлических цилиндров кругового сечения, образующих квадратную решетку.

Говоря о практической реализации последних, следует, однако, отметить, что локализация излучения внутри ФК возможна только при условии эффективного возбуждения области дефекта. Поскольку на частотах, соответствующих запрещенной зоне, уровень излучения экспоненциально убывает при прохождении внутрь кристалла, указанный способ создания резонаторных структур не применим к ФК больших размеров либо состоящим из сильно рассеивающих элементов.

Рассмотрим сказанное на примере ФК, образованного двумерной системой круговых металлических цилиндров. Особенности такого ФК являются: во-первых, монотонная зависимость поперечников рассеяния составляющих его элементов от частоты, обуславливающая отсутствие у отдельных рассеивателей собственных резонансных свойств; во-вторых, наличие запрещенной зоны в области низких частот, не возникающей в диэлектрических ФК.

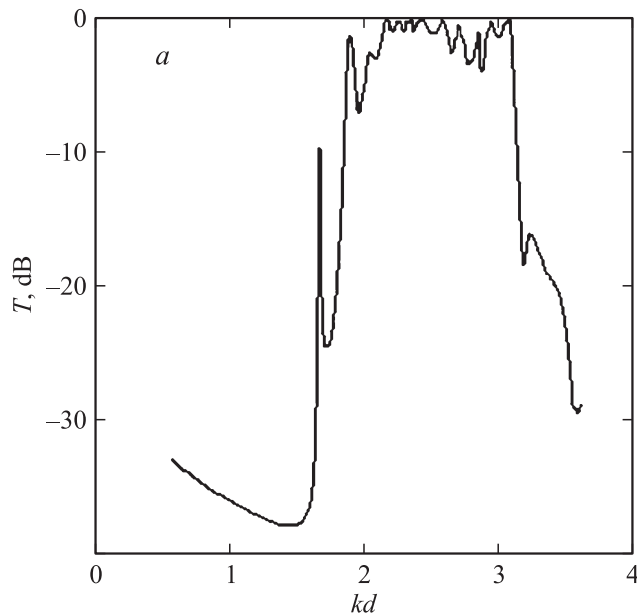
На рис. 1 представлена зонная структура ФК из металлических цилиндров, образующих квадратную решетку, рассчитанная методом разложения собственных функций по плоским волнам (plane wave expansion method) [1,3]. На оси абсцисс указаны основные симметричные точки в первой зоне Бриллюэна двумерного кристалла. В рас-

четах отношение периода размещения цилиндров  $d$  к их диаметру принималось равным 14, что соответствует коэффициенту заполнения структуры 0.004, а параметр  $d/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны, варьировался в диапазоне от 0 до 1.3. Рассматривался случай  $E$ -поляризации, т.е. вектор напряженности электрического поля был ориентирован параллельно цилиндрам. Диэлектрическая проницаемость материала цилиндров считалась частотно-независимой, что допустимо на частотах, значительно меньших плазменных частот носителей заряда в металле.

Из полученных результатов следует, что в интервале значений  $d/\lambda$  от 0 до 0.27 располагается полная запрещенная зона. Также можно отметить наличие неполных запрещенных зон, соответствующих более высоким частотам, в направлениях ГХ (0, 1) и ГМ (1, 1).

Дальнейшее численное моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с ФК проводилось на основе теории многократного рассеяния. Методика расчетов применительно к задачам дифракции волн на системах цилиндрических элементов подробно обсуждалась в [9]. В нашем случае предполагалось, что структура возбуждается полем линейного источника, находящегося на значительном удалении от ФК. При этом вновь рассматривались только  $E$ -поляризационные волны, падающие на структуру в направлении (0, 1). В ходе моделирования определялись: частотная зависимость коэффициентов прохождения волн через ФК  $T = 10 \lg(I/I_0)$ , где  $I$  и  $I_0$  — интенсивности поля, прошедшего через структуру, и в ее отсутствие соответственно; частотная зависимость относительной интенсивности излучения  $I/I_0$  в центральной области ФК; двумерное распределение поля в ФК.

На рис. 2 приведены соответствующие зависимости, полученные для ФК, представляющего собой решетку 9 на 9 элементов с дефектом, образованным удалением центрального элемента структуры. Анализ частотных зависимостей проводился в диапазоне изменений безразмерного параметра  $kd = 0.5 \div 3.6$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число. Изображенные на рис. 2, *a* результаты демонстрируют наличие в рассматриваемом диапазоне частот двух запрещенных зон, первая из которых, как было показано выше, является полной. Из рис. 2, *b* следует, что в этой зоне вблизи ее границы ( $kd = 1.67$ ) и возникает дефектная мода. Ее появление приводит к существенной локализации поля в дефекте структуры, видимой на вставке в рисунок, где представлено пространственное распределение поля на данной частоте, а стрелками указано направление прихода излучения.



**Рис. 2.** Частотная зависимость: *a* — коэффициента прохождения для ФК, представляющего собой структуру 9 на 9 элементов с дефектом в центре; *b* — относительной интенсивности в центре такого ФК; на вставке показано пространственное распределение поля при  $kd = 1.67$ .

Здесь следует отметить, что вышеуказанное количество элементов в данном ФК является оптимальным для формирования дефектной моды. Любое изменение их числа как в большую, так и в меньшую сторону приводит к резкому уменьшению степени локализации излучения в дефекте структуры. При этом смещение дефекта к облучаемой границе в ФК больших размеров также не улучшает локализацию поля, поскольку оказывается эквивалентно уменьшению добротности образуемого дефектом резонатора [4].

На наш взгляд, альтернативой для создания резонаторных структур на основе ФК может являться использование особенностей распределения поля в бездефектных ФК на частотах, лежащих непосредственно вблизи границ запрещенных зон.

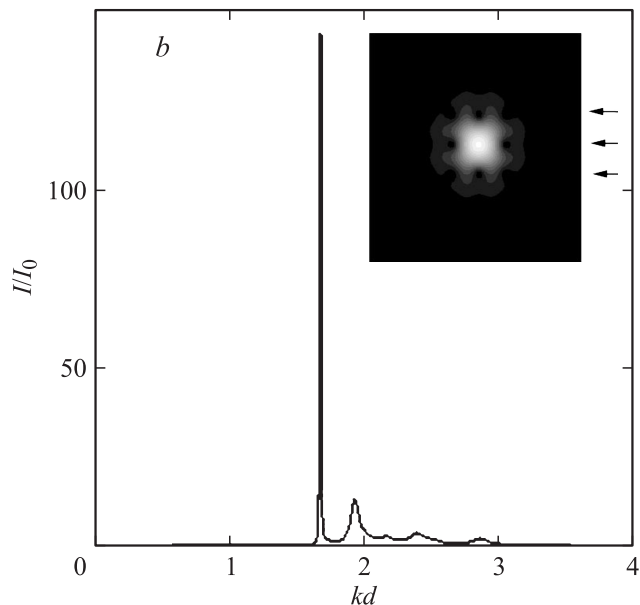
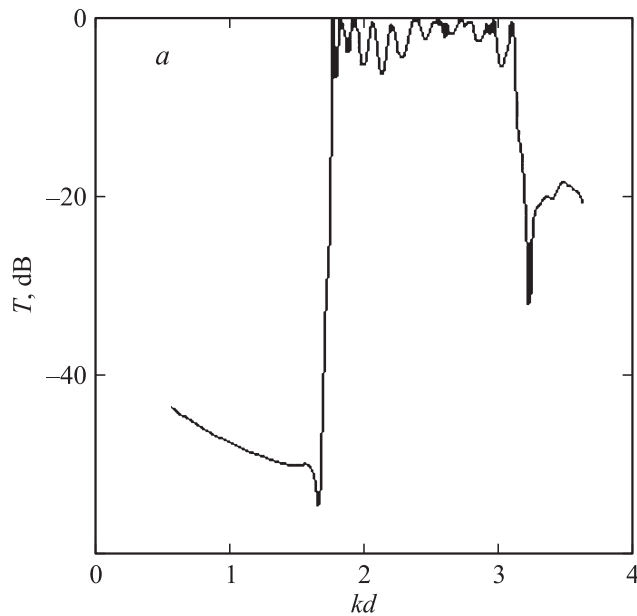


Рис. 2 (продолжение).

Вновь обратимся к анализу свойств ФК, описанного выше, однако в данном случае рассмотрим бездефектную структуру существенно больших размеров, состоящую из 11 рядов элементов вдоль направления прихода излучения и 21 ряда поперек. На рис. 3 изображены полученные для нее зависимости, аналогичные представленным на рис. 2. Из сравнения рис. 3, *a* и 2, *a* следует, что границы запрещенных зон в кристаллах без нарушения внутренней структуры и с одиночными точечными дефектами совпадают, хотя в первом случае граница полной запрещенной зоны оказывается более резко очерченной из-за отсутствия вблизи нее дефектной моды.

Наиболее интересными представляются результаты, отображенные на рис. 3, *b*. Из них следует, что в регулярных ФК на границах запрещенных зон (в данном случае при  $kd = 1.75$  и  $3.12$ ) возникают условия для локализации излучения в структуре. Как видно из вставки в рисунок, где представлено двумерное распределение поля при  $kd = 1.75$ , поле на этой частоте сосредоточивается внутри ФК



**Рис. 3.** Частотная зависимость: *a* — коэффициента прохождения для бездефектного ФК, представляющего собой структуру 11 на 21 элемент; *b* — относительной интенсивности в центральной области такого ФК; на вставке показано пространственное распределение поля при  $kd = 1.75$ .

с максимумом в центральной его области. Поскольку данная картина возникает на фиксированной частоте, можно сказать, что подобные структуры обладают резонансными свойствами. При этом, в отличие от ФК с дефектами, роль резонатора выполняет не некоторая область структуры, а кристалл в целом.

Отличительной особенностью данного режима является то, что он проявляется в ФК любой геометрии, образованных любым количеством элементов. При этом с увеличением числа элементов увеличивается и уровень локализованного в структуре излучения. Кроме того, незначительным изменением частоты относительно резонансной можно достигнуть такого перераспределения излучения в ФК, что вместо его локализации с максимумом в центральной области структуры возникнут

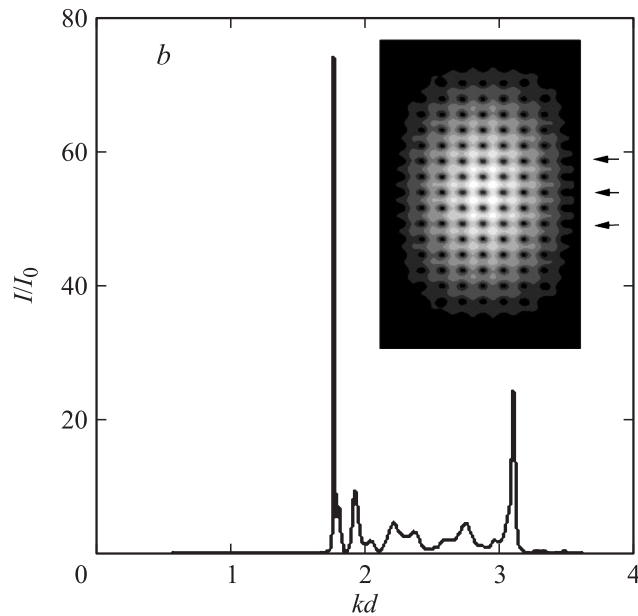


Рис. 3 (продолжение).

две или более области концентрации поля, располагающиеся симметрично относительно границ структуры вдоль направления прихода падающей на ФК волны.

Физический механизм, приводящий к наблюдаемым эффектам, по-видимому, заключается в следующем. На частотах, располагающихся вблизи диапазона частот, соответствующих условию брэгговского отражения, являющегося причиной формирования запрещенных зон в ФК, несинфазность отражательного действия элементарных одномерных решеток цилиндров, образующих двумерную структуру, приводит к тому, что излучение проникает в глубь ФК. В результате отражение от кристалла в целом оказывается весьма незначительным. Однако по мере прохождения в ФК первичное поле, подвергаясь воздействию указанных дифракционных структур, действующих на частоте, близкой к полной запрещенной зоне во всех направлениях распространения, оказывается „захваченным“ ФК, локализуясь внутри него.

## Список литературы

- [1] *Joannopoulos J., Meade R., Winn J.* Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton: Princeton University Press. 1995.
- [2] *Bush K., John S.* // Phys. Rev. B. 1998. V. 58. P. 3896–3904.
- [3] *Sakoda K.* Optical Properties of Photonic Crystals. Berlin: Springer, 2001.
- [4] *Шабанов В.Ф., Ветров С.Я., Шабанов А.В.* Оптика реальных фотонных кристаллов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
- [5] *Желтиков А.М., Магницкий С.А., Тарасишин А.В.* // ЖЭТФ. 2000. Т. 117. № 3. С. 691–701.
- [6] *Bayindir M., Temelkuran B., Ozbay E.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 10. P. 2140–2143.
- [7] *Lin S.Y., Chow E., Hietala V.* et al. // Science. 1998. N 282. P. 284–289.
- [8] *Zhao Y.-C., Yuan L.-B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 015403.
- [9] *Иванов Е.И.* Дифракция электромагнитных волн на двух телах. Минск: Наука и техника, 1968.