

ОСОБЕННОСТИ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА, ЗАПОЛНЕННОГО РЕЗОНАНСНЫМ ГАЗОМ

© 2010 г. С. Я. Ветров*, доктор. физ.-мат. наук; Н. В. Рудакова*; И. В. Тимофеев**, канд. физ.-мат. наук

* Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

** Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск

E-mail: tiv@iph.krasn.ru

Проведен расчет зонной структуры двумерного фотонного кристалла, состоящего из бесконечных цилиндрических отверстий, заполненных резонансным газом и образующих квадратную решетку в диэлектрической матрице. Обнаружены дополнительная узкая полоса пропускания вблизи края запрещенной зоны, а также дополнительная запрещенная зона в сплошном спектре фотонного кристалла. Новые свойства дисперсии существенно зависят от доли резонансного газа в фотонном кристалле, а также от плотности резонансного газа и положения резонансной частоты относительно края запрещенной зоны.

Ключевые слова: резонансный фотонный кристалл, фотонная запрещенная зона, зонная структура.

Коды OCIS: 160.5298, 160.5293

Поступила в редакцию 13.04.2010

Спектральные свойства фотонного кристалла (ФК) можно существенно изменять, помещая внутрь периодической структуры резонансные среды (атомные или молекулярные газы, квантовые точки). Простейшей реализацией одномерного резонансного фотонного кристалла (РФК) являются слоистые структуры, состоящие из чередующихся слоев двух материалов, в качестве одного из которых рассматривается резонансный газ. Наиболее интересными являются РФК, в которых оптические резонансы материалов близки к брегговским частотам решетки [1–3]. Сочетание резонансной дисперсии газа с дисперсией ФК-структуры приводит к качественному изменению спектров фотонных кристаллов, появляются узкие полосы прозрачности в фотонной запрещенной зоне (ФЗЗ), а также дополнительные запрещенные зоны в спектре пропускания ФК-структуры.

В настоящей работе, с помощью метода разложения собственных функций по плоским волнам, исследуется спектр s -поляризованных электромагнитных волн наполненной резонансным газом двумерной структуры с ФЗЗ. Мы рассмотрим РФК, состоящий из бесконечных цилиндрических отверстий, заполненных резонансным газом, чьи пересечения с перпендикулярной плоскостью xy формируют квадратную решетку в диэлектрической матрице.

Структура РФК характеризуется диэлектрическими проницаемостями соответственно матрицы ε_1 и резонансного газа $\varepsilon_2(\omega)$. Диэлектрическая проницаемость газа в модели Лоренца дается выражением

$$\varepsilon_2 = 1 + \omega_p^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega),$$

где $\omega_p^2 = 4\pi N F e^2 / m$, e – заряд электрона, m – масса электрона, N – плотность резонансных атомов, F – сила осциллятора, γ – ширина линии, ω_0 – центральная частота резонанса, ω – частота излучения. Фактор заполнения, то есть доля резонансного газа в ФК, определяется выражением $f = \pi r^2 / a^2$, где r – радиус цилиндра, a – период структуры.

В первую очередь расчеты проводились для РФК с $\varepsilon_1 = 3,24$ и периодом структуры $a = 158$ нм. Фактор заполнения $f = 80\%$, ширина линии и плазменная частота резонансного газа, взятые близкими к их значениям для паров ртути [1], равны соответственно $\gamma = 2,19 \times 10^{-7} \omega_G$, $(\omega_p)^2 = 9,5 \times 10^{-8} (\omega_G)^2$, где $\omega_G = \pi c n_G / a$ – характеристическая частота ФЗЗ, $n_G = f + (\varepsilon_1)^{1/2} (1 - f)$ – усредненный показатель преломления среды. Резонансу атомов ртути на длине волны $\lambda_0 = 253,7$ нм соответствует ширина линии $\gamma = 1,2$ ГГц.

На рис. 1 представлена зонная структура спектра затравочного ФК и фрагмент спектра

РФК с цилиндрами, заполненными резонансным газом. Для затравочного ФК фотонная запрещенная зона в направлении X зоны Бриллюэна располагается в частотном диапазоне ω/ω_G от 0,854 до 1,077 (рис. 1а). Сочетание дисперсии ФК-структуры с дисперсией газа приводит к появлению дополнительных запрещенных зон в сплошном спектре затравочного ФК и дополнительных узких полос пропускания в ФЗЗ, которые незаметны в масштабе рис. 1а. Эти эффекты иллюстрируются на рис. 1б. Ширины $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ дополнительных запрещенных зон и полос прозрачности на порядок превышают ширину резонансной линии γ .

При изменении фактора заполнения f и неизменных прочих параметрах системы границы фотонной запрещенной зоны смещаются относительно резонансной частоты газа ω_0 . Даже незначительное изменение положения ω_0 относительно границы зон может вызвать существенную трансформацию дополнительных полосы прозрачности и запрещенной зоны. Этот эффект иллюстрируется на рис. 2.

Из сравнения рис. 2 с рис. 1б видно, что при уменьшении f на 2%, то есть до 78%, резонансная частота ω_0 удаляется в точку X от высокочастотного края запрещенной зоны и соответственно ширина дополнительной полосы пропускания $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ уменьшается почти в 4 раза. В точке M зоны Бриллюэна ширина дополнительной запрещенной зоны уменьшается в 5 раз. Шириной

дополнительных полосы пропускания или запрещенной зоны можно управлять путем изменения давления газа. В случае ударного механизма уширения эти ширины имеют линейный характер зависимости от давления.

Рассмотренные эффекты позволяют расширить возможности создания новых ФК с заданными свойствами. Такие РФК могут быть перспективны для создания узкополосных фильтров с высоким значением контраста фильтрации оптического излучения и спектральных призм с увеличенной дисперсией.

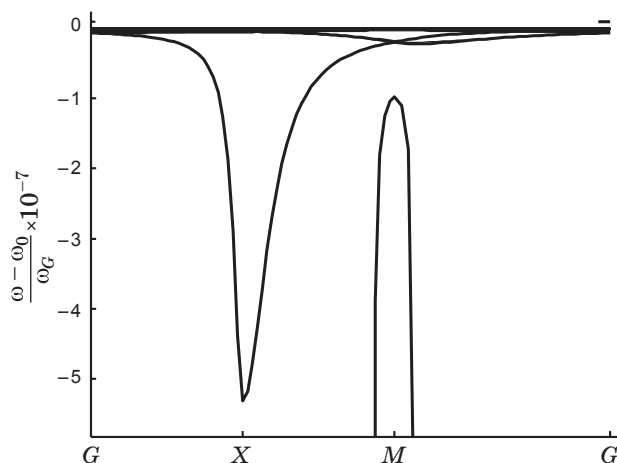


Рис. 2. Фрагмент зонной структуры при соотношении $\omega_0/\omega_G = 1,056$, $f = 78\%$. Остальные параметры те же, что и для рис. 1.

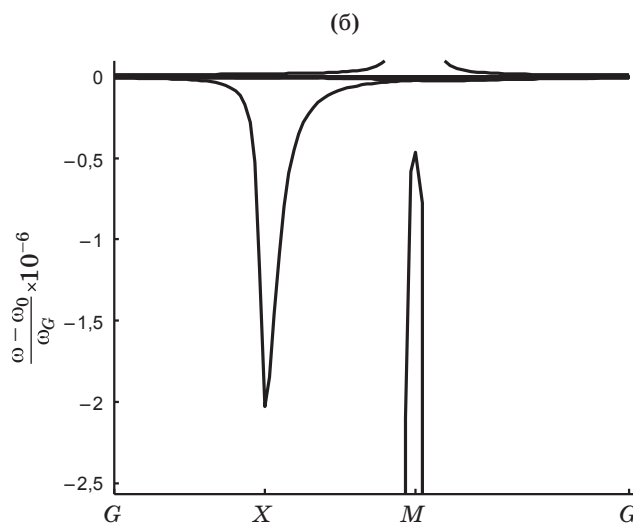
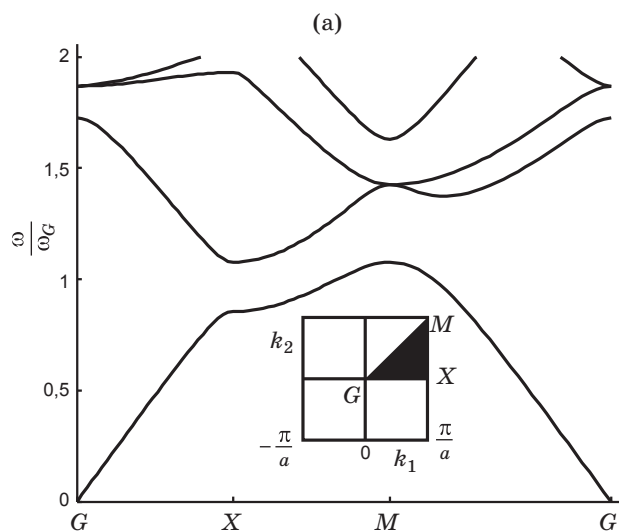


Рис. 1. Зонная структура квадратной решетки цилиндров в диэлектрической матрице. а – структура спектра затравочного ФК с полыми цилиндрами в диэлектрической матрице, $\epsilon_1 = 3,24$, $\epsilon_2 = 1$. Вставка показывает зону Бриллюэна, неприводимая зона заштрихована, б – фрагмент зонной структуры при соотношении резонансной частоты и параметров ФК-структуры $\omega_0/\omega_G = 1,071$, $f = 80\%$.

Работа выполнена при поддержке грантов РПН.2.1.1.3455; № 27.1 и №3.9.1 РАН; № 5 и № 144 СО РАН; г/к 02.740.11.0220 по ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Желтиков А.М., Наумов А.Н., Баркер П., Майлс Р.Б. Управление свойствами дисперсии и спектром

пропускания комбинированных оптических элементов на основе наполненных резонансным газом фотонно-кристаллических структур // *Опт. и спектр.* 2000. Т. 89. № 2. С. 309–313.

2. Artoni M., Rossa G.La, Bassani F. Resonantly absorbing one-dimensional photonic crystals // *Phys. Rev.* 2005. E 72. P. 046604-1–046604-11.

3. Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Кутукова А.Ю. Спектральные свойства резонансного одномерного фотонного кристалла // *Опт. и спектр.* 2009. Т. 106. № 5. С. 838–842.