

## 光子晶体势阱中的共振透射模\*

## Resonance Transmission Modes in Photonic Crystals Well

王玉玲,秦晓冰,魏承炀,黄创高,高英俊

WANG Yu-ling, QIN Xiao-bing, WEI Cheng-yang, HUANG Chuang-gao, GAO Ying-jun

(广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁 530004)

(School of Physics Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要:引入简单镜像对称的一维二元光子晶体结构模型,应用传输矩阵方法研究在该镜像对称的一维二元光子晶体结构模型两端加入高折射率介质时的光子带隙结构.结果表明,加入较高的折射率介质时,光子晶体原来的带隙结构中存在的窄的共振透射峰变宽,且随着势垒的不断增加,分裂的共振峰变得越来越细,中间的共振峰透过率一直保持在 100%,而两侧的峰高则有所降低;当两端加入的介质折射率进一步提高,这时共振透射峰分裂为 3 个窄的共振透射峰,同时还在其他波长处出现多个窄的透射峰.这种带隙结构可以用来设计优异理想窄带滤波器.

关键词:光子晶体 镜像缺陷 透射带结构 滤波器

中图分类号:O431 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2008)01-0041-03

**Abstract** Band gap structures of 1D-two element photonic crystals with simple mirror symmetry and with much higher refractive indexes are calculated by using transfer matrix method. The results indicate that the narrow resonance transmission peak in photonic band gap becomes wider when adding two higher refractive indexes dielectric at it. When the two dielectrics refractive indexes become much higher, the resonance transmission peak split into three narrow resonance peaks, at the same time there are many new narrow transmission peak appearing in transmission spectrum. This is an ideal capability in designing excellent light wave filter.

**Key words** photonic crystals, mirror symmetry, photonic band gap, filter

自从上世纪提出光子晶体的概念<sup>[1,2]</sup>以来,人们对光子晶体进行了广泛的研究.由于光子晶体具有光子带隙,使其具有广泛的应用价值.在光子晶体应用中,许多都涉及到缺陷态结构和缺陷模,因此对光子晶体缺陷特性的研究倍受重视<sup>[3-5]</sup>.但目前的研究集中在光子晶体结构中引入缺陷层来获得缺陷模式,并进行相关的特性研究<sup>[6,7]</sup>.本文引入简单镜像对称模

式的一维二元光子晶体结构模型,研究在该镜像对称的光子晶体结构模型的两端加入高折射率的介质时的光子带隙结构,分析其共振峰分裂的新特性.

## 1 理论模型

简单的镜像对称型光子晶体结构如图 1 所示.它只需在完整的光子晶体中央抽掉一层高折射率介质 A,这时镜像对称型的光子晶体介质的排列为 ABABABABBABABABA 结构,它是由两种折射率相差较大的材料 A B 交替排列的一维光子晶体,但在中央形成两侧对称排列,构成含镜像缺陷层的结构模型.材料 A B 对应介质层的折射率和厚度分别为  $(n_a, a)$ ,  $(n_b, b)$ .假设光从左向右以一定角度  $\theta$  入射光子晶体,依据传输矩阵理论<sup>[8]</sup>,光波与介质层的相互

收稿日期:2007-03-30

修回日期:2007-11-22

作者简介:王玉玲(1979-),女,硕士研究生,主要从事光子晶体与负折射率材料的研究.

\* 国家自然科学基金项目(50061001,50661001),广西科学基金项目(桂科基 0342004-1,0639004),广西“十百千人才工程”项目(2001207),广西研究生教育创新计划项目(2006105930805M19)资助.

作用由其特征矩阵决定,对于横向电场 (TE)模的情况,单介质层的特征矩阵为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos Y_j & -\frac{i}{Z_j} \sin Y_j \\ -i Z_j \sin Y_j & \cos Y_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$Y_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j h_j \cos \theta_j, \quad (2)$$

$$Z_j = \frac{\bar{X}_j}{\bar{Y}_j} \cos \theta_j, \quad (3)$$

$\theta_j$  和  $\lambda$  分别为入射角和入射波长,  $h_j$  为介质层厚度,  $\bar{X}_j$  和  $\bar{Y}_j$  分别为  $j$  层介质的介电常数和磁导率常数,  $j$  层介质的折射率为  $n = \sqrt{\bar{X}_j}$ . 设研究的所有介质都为非磁性的 ( $\bar{Y}_j = 1$ ).

对于一维光子晶体,当膜层包含  $N$  层时,整个膜系统的特征矩阵  $M$  可由各个膜系的特征矩阵  $M_j$  的连乘积求得.

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (4)$$

通过  $M$  可得出膜层的反射系数,透射系数,反射率和透射率.

反射系数

$$r = \frac{AZ_0 + BZ_0^2 - C - DZ_0}{AZ_0 + BZ_0^2 + C + DZ_0}, \quad (5)$$

反射率

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

透射系数

$$t = \frac{2Z_0}{AZ_0 + BZ_0^2 + C + DZ_0}, \quad (7)$$

透射率

$$T = |t|^2, \quad (8)$$

$Z_0$  为真空的光学导纳, (5)式和 (7)式是光子晶体两端都为空气情况的结果.

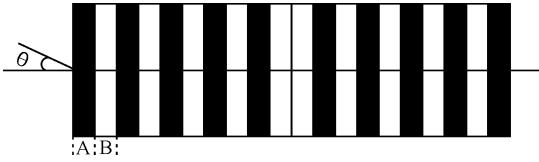


图1 镜像对称缺陷模式的一维光子晶体模型  
Fig. 1 The mirror defect 1-D photonic crystals model

## 2 数值模拟和结果分析

对于图 1所示的一维镜像对称光子晶体结构模型,选取 A 介质为  $ZnS, n_A = 2.35$ , B 为  $MgS, n_B = 1.38$ ,取中心波长为  $\lambda_0 = 600nm$ ,则根据光学理论中多光束干涉原理,取两层介质的光学厚度为  $1/4$ 中心波长,即  $n_A d_A = n_B d_B = 600/4 = 150nm$ .

在上述包含镜像对称缺陷的一维光子晶体模型

两端加入高折射率的介质 D,构成一个“三明治”状的光子势阱结构,如  $DA(BA)_m BB(AB)_m AD$ 结构,这里  $m = 4$ . 介质 D 相当于光子晶体势垒.

利用传输矩阵方法<sup>[8]</sup>计算,得到光垂直入射时的光子晶体的禁带结构如图 2所示.从图 2可见,在 503~747nm 处出现光子晶体禁带,在中心波长 600nm 处,出现一个窄的完全透射的共振峰,透过率达到 100%,这是由于光子晶体镜像对称缺陷引起的<sup>[9-13]</sup>.

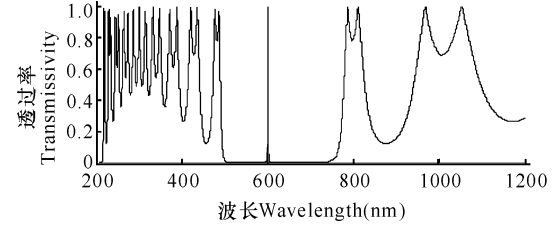


图2 镜像缺陷模式的一维光子晶体的带隙结构  
Fig. 2 The band-gap structure of 1-D photonic crystal mirror defect model

当加入的介质 D 的折射率小于 4.5 时,例如介质 D 用冰晶石,折射率  $n_D = 4.1$ ,在中心波长 600nm 处,原来窄的透射共振峰变宽了数倍.若介质 D 的折射率增加到 5 时,出现透射共振峰分裂的临界状态.当介质 D 的折射率继续增加,则共振峰分裂为 3 个锐的共振峰,且越来越锐.对于这一现象可以利用光子晶体势阱对光的约束来解释.当介质 D 的折射率较小时,势阱较宽、较浅,对光子的约束较弱,易出现共振隧穿效应.因此,透射共振峰相对未加势垒时的峰较宽,但不分裂;当介质 D 的折射率超过 5 时,相当于势垒足够高,对光子的约束足够强,于是开始出现共振峰分裂,较宽的共振峰分裂为 3 个锐的共振峰,分裂的峰的数量与  $m$  有关. $m = 2$  时不分裂, $m = 3$  时分裂为 2 个峰, $m = 4$  时分裂为 3 个峰.这里计算  $m = 4$ ,因此分裂为 3 个共振峰.图 3 显示光子晶体势阱中与图 2 的共振峰对应的 600nm 波长处的共振峰分裂为 3 个峰的变化过程.由图 3 可见,随着势垒的不断增高,分裂的共振峰变得越来越细,中间的共振峰透过率一直保持在 100%,而两侧的峰高则有所降低.说明设计多通道的光学滤波器,可以通过改变势阱高度和光子晶体的周期数  $m$  而获得所需光学滤波通道数,实现按需要设计多通道的光学滤波器.

对于加了高折射率的介质 D,形成光子晶体势垒后,原来较宽的透过带变成了窄的透过带(见图 4 和图 5).例如,图 4 显示,原来在图 2 中 600nm 处的窄透过带变宽,在 600~1200nm 范围内出现了多个禁带,原来在图 2 中较宽的透过带,现在变成了窄透过带;在波长为 800nm, 860nm 和 1050nm 处出现的窄透过带.

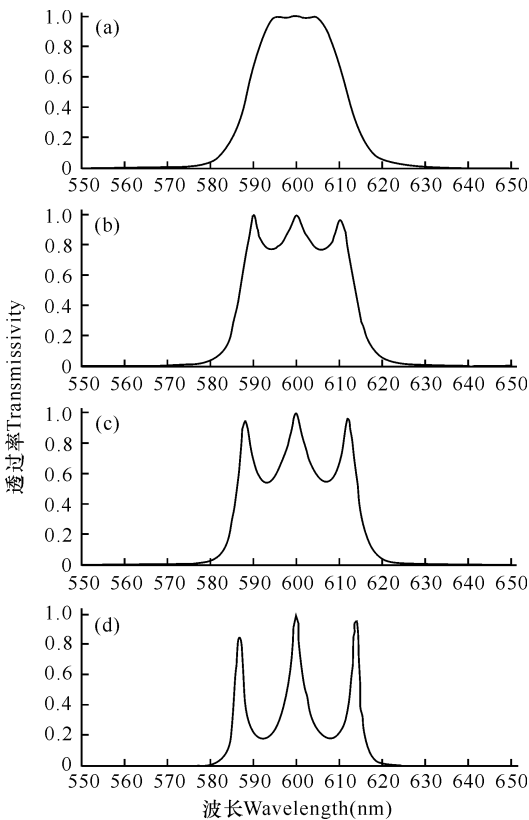


图3 中心600nm波长处共振透射峰的分裂演化过程

Fig. 3 The decomposition evolutionary process of resonant transmission peak with the center wavelength of 600nm

(a)  $n_D: n_D = 5: 5$ , (b)  $n_D: n_D = 6: 6$ , (c)  $n_D: n_D = 7: 7$ , (d)  $n_D: n_D = 10: 10$ .

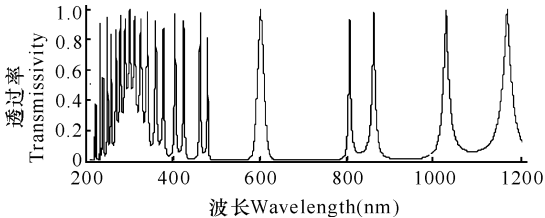


图4 光子晶体势阱介质  $n_D: n_D = 4: 4$  时的带隙结构

Fig. 4 Photonic crystals potential well band-gap when the ratio of refractive index is  $n_D: n_D = 4: 4$ .

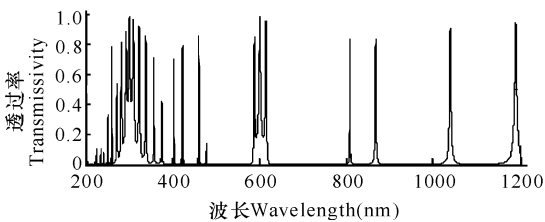


图5 光子晶体势阱介质  $n_D: n_D = 10: 10$  时的带隙结构

Fig. 5 Photonic crystals potential well band-gap when the ratio of refractive index is  $n_D: n_D = 10: 10$ .

### 3 结论

利用传输矩阵方法研究简单一维镜像对称光子晶体势阱的共振峰分裂特性,得到如下结论.

(1)当加的光子晶体势阱介质 D 的折射率为 3 时,在中心波长 600nm 处,原来窄的透射共振峰变宽数倍.若介质 D 的折射率增加到 5 时,出现透射共

振峰分裂的临界状态.当介质 D 的折射率继续增加,则共振峰分裂为 3 个锐的共振峰,且越来越锐.

(2)随着势垒的不断增高,分裂的共振峰变得越来越细,中间的共振峰透射率一直保持在 100%,而两侧的峰高则有所降低.

(3)加了高折射率的介质 D,形成光子晶体势垒后,原来较宽的透射带则变成了窄的透射带.

利用这些共振峰分裂特性,可以设计性能优异的多道光通滤波器,高精度窄带滤波器等,对新型光子晶体器件的设计具有理论指导意义.

### 参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photon in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Ouyang Zhengbiao, Liu Haishan, Li Jingzhen. Photonic crystal super narrow optical filters [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 281-284.
- [4] Chen Xianfeng, Shen Xiaoming. Studies on the defect mode properties of 1D photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1876-1880.
- [5] Chun Xu, Dezhuan Han. Photonic band structure calculation of a doped semiconductor [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90: 061112-06118.
- [6] Laxmi S, Parmanand M. Photonic band gap effect in one-dimensional plasma dielectric photonic crystals [J]. Solid State Comm, 2006, 138: 160-164.
- [7] 王玉玲,高英俊,王娜.含缺陷一维光子晶体的超窄带滤波特性分析 [J].广西科学, 2007, 14(1): 56-58.
- [8] Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of PCs [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1095-1098.
- [9] Shen Jie, Ma Guohong, Zhuang Jianhua. Research on two photon absorption enhancement in one-dimensional photonic crystals with double defect modes [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(19): 1404-1408.
- [10] Yano S, Segawa Y. Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystal [J]. Phys Rev B, 2001, 63(15): 153316-153320.
- [11] Chen Qin, Huang Yongzhen, Guo Weihua. Modulation of photonic band-gap and localized states by dielectric constant contrast and filling factor in photonic crystals [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(12): 1233-1238.
- [12] Wang Xudong, Liu Fang. Studies on the optical characteristics of 1D polybasic photonic crystal [J]. J Optoelectronics Laser, 2004, 15(1): 104-107.
- [13] V A Tolmachev, T S Perova. Experimental evidence of photonic band gap extension for disordered 1D photonic crystals based on Si [J]. Optics Communications, 2006, 259: 104-106.

(责任编辑:韦廷宗 邓大玉)