

文章编号: 1001-3806(2010)04-0486-03

## 对称和非对称结构 1 维光子晶体的滤波特性

张芬, 肖峻\*, 谢康

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

**摘要:** 为了得到 1 维光子晶体新的滤波特性, 并把这种特性应用到滤波器的设计中, 采用传输矩阵法计算了对称和非对称结构 1 维光子晶体的滤波特性, 同时还分析了不同的折射率比对两种结构 1 维光子晶体滤波特性的影响。结果表明, 对称结构 1 维光子晶体可实现窄带滤波功能, 该结构的滤波器对入射角的选取是有限的, 不适于微弱信号的检测; 且当多层膜系外层为高折射率时, 透射带宽要窄些。非对称结构光子晶体则具有带阻滤波特性, 与对称结构 1 维光子晶体最大的不同是改变膜系中高低折射率材料的顺序, 其滤波特性没有变化。理论分析和数值模拟结果为设计窄带滤波器和带阻滤波器提供了依据。

**关键词:** 材料; 光子晶体; 滤波特性; 传输矩阵; 对称; 非对称

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.015

### Filtering properties of 1-D photonic crystals with symmetrical and asymmetrical structures

ZHANG Fen, XIAO Jun, XIE Kang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** In order to obtain the filtering characteristics of photonic crystals with symmetrical structure and asymmetrical structure, the influence of refractive index ratio for both the structures was analyzed based on the transfer matrix method. The results indicate that the photonic crystals with symmetrical structure have narrow-band filtering characteristics at selected incident angles. However, it is not suitable for weak signal detection. Their transmission bandwidth is narrower when the outer layer of multi-layer coating films is at high refractive index. The photonic crystals with asymmetrical structure have band-stop filtering characteristics and the characteristics maintain the same for any sequence of high or low refractive index. The theoretical analysis and simulation results provide the theory for developing narrow-band and band-stop filters.

**Key words:** materials; photonic crystal; filtering properties; transfer matrix; symmetry; asymmetry

## 引言

自从 1987 年光子晶体<sup>[1,2]</sup>的概念提出以来, 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结构, 使其具有广泛的应用价值。

目前有很多研究主要集中在光子晶体中引入缺陷来获得缺陷模式, 并进行相关特性的研究<sup>[3-6]</sup>, 大多数仅对一种结构的光子晶体的特性进行研究<sup>[7-9]</sup>, 本文中则研究了对称结构和非对称结构两种 1 维光子晶体的滤波特性。这两种结构制备简单, 而且拥有更优异的滤波特性。通过分析各结构参量以及高

低折射率膜层排列顺序的不同对滤波特性的作用, 可为设计性能优异的带阻滤波器和窄带滤波器提供参考。

## 1 理论模型

如图 1 所示, 考虑由 A, B 两种不同的材料(介电

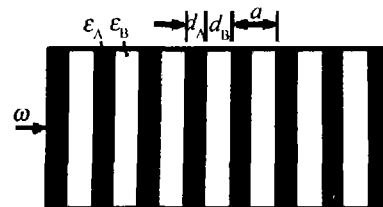


Fig. 1 Model of 1-D photonic crystal

常数分别为  $\epsilon_A$  和  $\epsilon_B$ ) 沿  $z$  轴方向生成的多层膜体系, 相应的厚度分别为  $d_A$  和  $d_B$ 。假设光以频率  $\omega$  从左向右以一定角度  $\theta$  入射光子晶体, 根据传输矩阵理论<sup>[10]</sup>, 介质层对光波的作用由其特征矩阵决定。对于 TE 模光波, 单层膜的特征矩阵为:

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(60588502)

作者简介: 张芬(1984-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光子晶体的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: junxiao@uestc.edu.cn

收稿日期: 2009-06-25; 收到修改稿日期: 2009-09-17

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & \frac{j}{\eta_i} \sin\delta_i \\ j\eta_i \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\delta_i = (2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon_i}d_i \cos\theta_i$ ,  $\eta_i = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0}\sqrt{\epsilon_i} \cos\theta_i$ ,  $\theta_i$  和  $\lambda$  分别为入射角和入射波长,  $d_i$  为介质层厚度,  $\epsilon_i$  为  $i$  层介质的介电常数。假设研究的所有介质都为非磁性的( $\mu_i = 1$ )。

对于1维光子晶体,当膜系包含  $N$  层时,整个膜系的特征矩阵  $M$  可由各个膜层的特征矩阵  $M_i$  的乘积求得:

$$M = \prod_{i=1}^N M_i = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (2)$$

由  $M$  可得出膜系的透射系数  $t$  和透射率  $T$  分别为:

$$t = 2\eta_0 / (A\eta_0 + B\eta_0\eta_{N+1} + C + D\eta_{N+1}) \quad (3)$$

$$T = t \cdot t^* \quad (4)$$

## 2 数值模拟和讨论

分别用  $(AB)^N(BA)^N$  对称和  $(AB)^N(AB)^N$  非对称的光子晶体结构。对称结构其光子晶体介质的排列为 ABABABBABABA, 由两种折射率不同的材料 A 和 B 交替排列而成,但在中央形成两侧对称排列。非对称结构的排列顺序则为 ABABABABABAB, 没有在中央形成两侧对称排列。取 A 层、B 层介质分别为 ZnS 和 GaAlAs, 折射率为  $n_A = 2.35$ ,  $n_B = 3.46$ , 周期数  $N = 10$ , 中心波长取在红外通信波段 ( $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ ,  $\omega_0$  为中心频率) 附近, 取各层介质的光学厚度为  $1/4$  中心波长, 即  $n_A d_A = n_B d_B = 1550/4 = 387.5$ 。利用传输矩阵法计算(在此只考虑 TE 模的情况), 得到光垂直入射时两种结构的滤波特性分别如图 2a 和图 2b 所示。

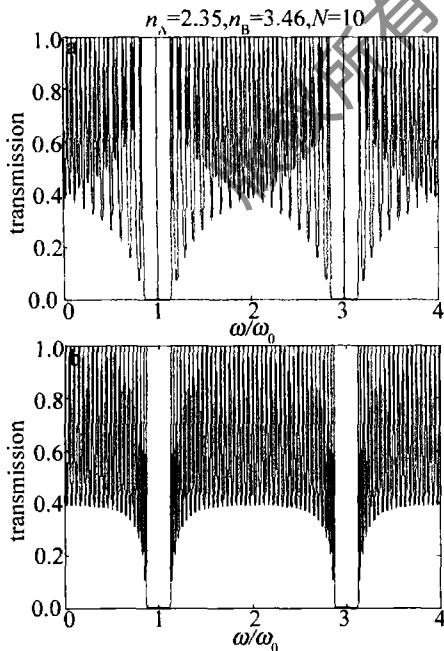


Fig. 2 Filtering properties of 1-D photonic crystals with symmetrical and asymmetrical structures  
a— $(AB)^N(BA)^N$  symmetrical structures b— $(AB)^N(AB)^N$  asymmetrical structures

从图中可以看出,在奇数倍频率处,非对称结构出现的是光子带隙,这种结构的光子晶体可作为一个理想的带阻滤波器。而对称结构在奇数倍频率处出现的是窄的透射峰,并在透射峰的两侧存在对称的光子禁带,这种结构的光子晶体可作为一个窄带滤波器。

### 2.1 $(AB)^N(BA)^N$ 对称结构的各参量对其滤波特性的影响

2.1.1 入射角对滤波特性的影响 保持其它参量不变,取入射角分别为  $0, \pi/30, 11\pi/180, \pi/12$ 。通过计算分析其滤波特性,如图 3 所示。随着入射角的增加,

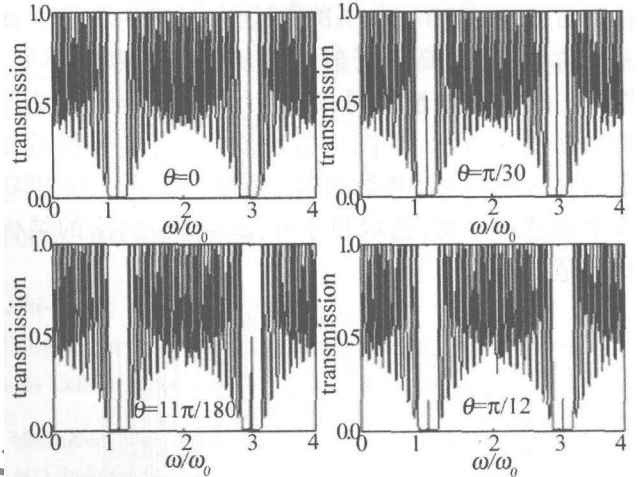


Fig. 3 Dependence of filter properties of 1-D  $(AB)^N(BA)^N$  photonic crystal on incident angles

中心波长透射率迅速下降,这对于微弱信号检测是不利的,因此,这种滤波器使用时对光束的入射角度有所限制。

### 2.1.2 折射率比对滤波特性的影响 考虑两种类

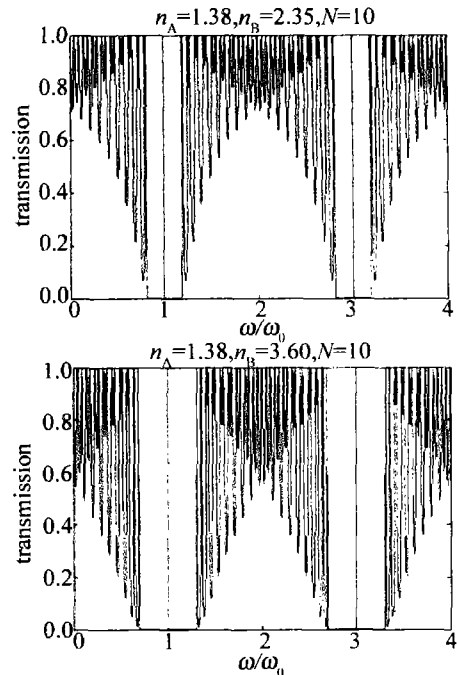


Fig. 4 Dependence of filter properties of 1-D  $(AB)^N(BA)^N$  photonic crystal on refractive index

型的介质组合,  $MgF_2$  和  $ZnS$ , 相对介电常数为  $\epsilon_A = 1.9044, \epsilon_B = 5.5225$ ;  $MgF_2$  和  $GaAs$ , 相对介电常数为  $\epsilon_A = 1.9044, \epsilon_B = 13$ , 通过计算分析其滤波特性如图4所示。从图中可以看出, 在相同的周期数情况下, 高低折射率比大者其透射带两侧的带隙宽度较大。

2.1.3 高低折射率膜层排列顺序的不同对滤波特性的影响 对于对称1维光子晶体还有一个新的特性, 当改变高低折射率膜层的排列顺序时, 表现出来的特性也不一样。将  $(AB)^N(BA)^N$  结构改变其排列方式变成  $(BA)^N(AB)^N$  结构, 虽然两种结构都是对称的, 但其高低折射率膜层的排列顺序不同。取  $N = 6$ , 其它参量相同, 通过计算分析得到其滤波特性如图5所示, 从图中可以看出, 当多层膜系外层为高折射率时, 透射带宽要窄些。所以, 要想获得窄的透射带宽, 选取膜系外层为高折射率的结构更合适。

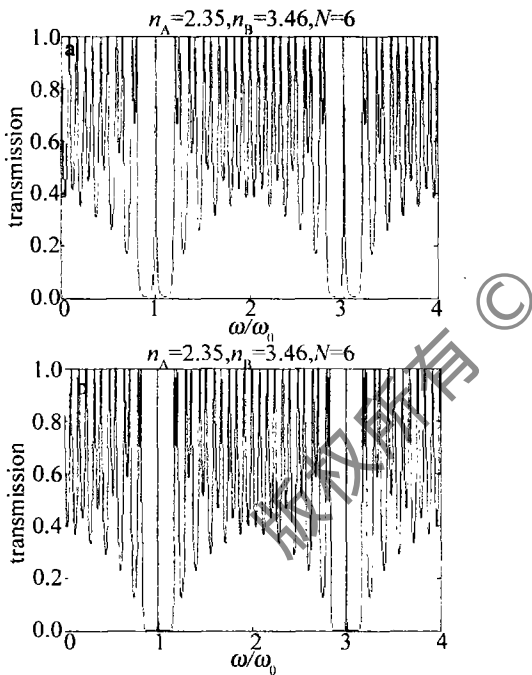


Fig. 5 Dependence of filter properties on refractive index film order  
a— $(AB)^N(BA)^N$  b— $(BA)^N(AB)^N$

## 2.2 $(AB)^N(AB)^N$ 非对称结构的各参量对其滤波特性的影响

2.2.1 入射角对滤波特性的影响 保持其它参量不变, 取入射角分别为  $\pi/6, \pi/4, \pi/3, 4\pi/9$ 。通过计算分析其滤波特性如图6所示, 从图中可以看出, 随着入射角的增加, 禁带中心位置均向高频(短波)方向移动, 且禁带变宽。当入射角为  $\pi/4$  时, 在2.5倍频率处形成了一个新的光子禁带。

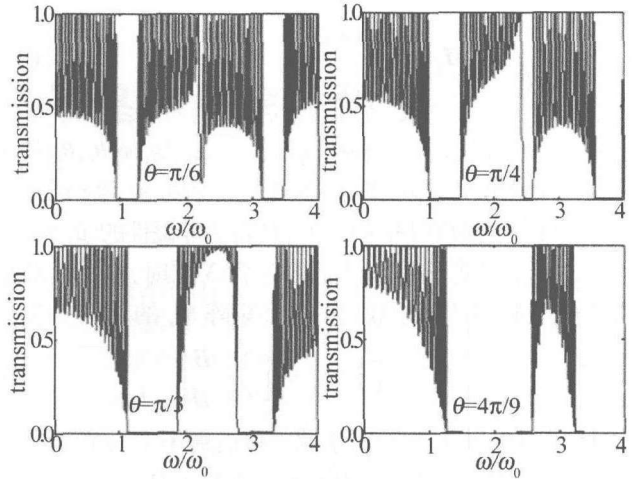


Fig. 6 Dependence of filter properties of 1-D  $(AB)^N(AB)^N$  photonic crystal on incidence angles

2.2.2 折射率比对滤波特性的影响 取与2.1.2节中同样的参量, 通过计算分析其滤波特性如图7所示。

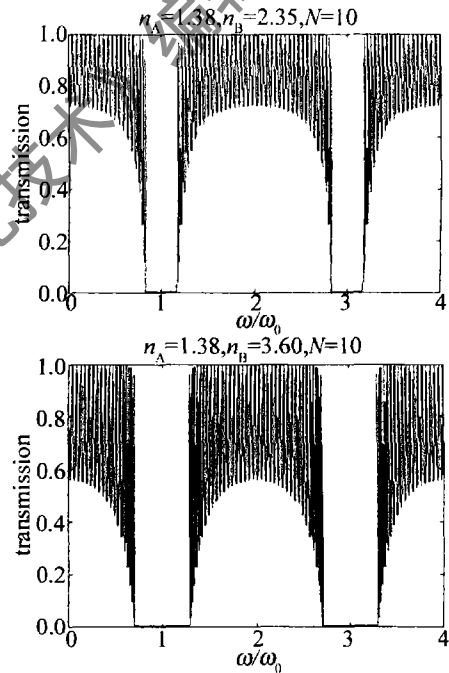


Fig. 7 Dependence of filter properties of 1-D  $(AB)^N(AB)^N$  photonic crystal on the rate of refractive index

在相同的周期数情况下, 高低折射率比大者其带隙宽度较大。在实际应用中, 一般希望获得的禁带较宽, 所以增加折射率比可以获得更宽的带隙。

## 3 结论

利用传输矩阵方法研究了对称结构和非对称结构1维光子晶体的滤波特性, 由研究可知, 在奇数倍频率处, 对称结构光子晶体出现的是窄的透射峰, 而非对称结构光子晶体出现的是光子禁带。对于对称结构光子晶体, 当多层膜系外层为高折射率时, 透射带宽要窄

(下转第492页)

### 3 结论

从飞秒脉冲在 SOI 波导中传输所满足的非线性薛定谔方程出发,在考虑波导的线性损耗和双光子吸收效应的情况下,理论推导了调制不稳定性增益谱表达式,论证了各种因素对调制不稳定性影响,并进行了仿真分析,部分结论得到了相关文献的实验验证。理论分析与仿真结果表明,调制不稳定性只能发生在反常色散区,其强度随着光脉冲的初始功率的增加而增强,表现为增益谱的峰值增益、增益带宽和峰值增益频率都随着脉冲光功率的增加而增加,且峰值增益频率和增益谱带宽都随传输距离的增加而指数衰减;双光子吸收虽然不影响调制不稳定性增益谱的峰值增益频率和增益谱带宽,但对峰值增益有明显改变,峰值增益随着双光子吸收效应的增强而降低。这些结论为硅基波导中的孤子传输和超连续谱产生及开发硅基波导非线性功能函数提供了理论参考。

#### 参考文献

- [1] GUO J Q. Theory analysis of array waveguide grid based on Si-slab [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):620-623 (in Chinese).
- [2] RONG H, LIU A, JONES R, *et al.* An all-silicon Raman laser [J]. *Nature*, 2005, 433(7023):292-294.
- [3] TANG B Q, XU J J, CHEN Z G, *et al.* Weak-light nonlinear optical effect and its application [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6):581-585 (in Chinese).
- [4] FOERST M, NIEHUSMAN J, PLOTZING T. High-speed all-optical switch in ion-implanted silicon-on-insulator or micro-ring resonators [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(14):2046-2048.
- [5] FOSTER M, TURNER A, SHARPING J, *et al.* Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. *Nature Photonics*, 2006, 441(7096):960-963.
- [6] ZHUO H, WEN S, DAI X, *et al.* Influence of nonlinear dispersion on modulation instability of inherent and partially inherent ultra-short pulse in meta-materials [J]. *Appl Phys*, 2007, B87(4):635-641.
- [7] REN Z J, WANG J, YANG A L. Modulation instability in decreasing dispersion fiber with different profiles [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2):156-159 (in Chinese).
- [8] PANOIU N C, CHEN X G, OSGOOD R M, *et al.* XPM-induced modulation instability in SOI photonic nanowires [C]//Frontiers in Optics, Optical Society of America. Rochester, New York: Optical Society of America, 2006:FWU2.
- [9] PORSEZIAN K, SENTHILNATHAN K, DEVIPRIYA S. Modulation instability in fiber Bragg grating with non-kerr nonlinearity [J]. *IEEE J Q E*, 2005, 41(6):789-796.
- [10] WU J W, LUO F G, ZHANG Q T, *et al.* Optical wave breaking of high-intensity femtosecond pulse in silicon optical waveguides [J]. *Opt & Laser Technol*, 2009, 41(3):360-364.
- [11] PANOIU N C, CHEN X G, OSGOOD R M, Jr, *et al.* Modulability in silicon photonic nanowires [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24):3609-3611.
- [12] CHEN X G, PANOIU N C, HSTEH I, *et al.* Third-order dispersion and ultra-fast pulse propagation in silicon wire waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24):2617-2619.
- [13] YIN L H, LIN Q, AGRAWAL P. Dispersion tailoring and soliton propagation in silicon waveguides [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9):1295-1297.
- [14] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. San Diego, CA: Academic, 2001:89-90.
- [15] SALI D R, MICKMAN J M. Light delocalization in a photonic crystals by a fill-fact or degeneracy [J]. *Phys Rev*, 2006, B74(2):195102.
- [16] JIN Y, HUANG Zh Y, CHEN X F, *et al.* Study on polarization of the phonyonic crystal defect mode [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):278-280 (in Chinese).
- [17] XIE Y M, LIU Zh D, WANG H Q. Local defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2):196-197 (in Chinese).
- [18] GAO Y J, WANG Y L, CHEN H N, *et al.* Transmission band characteristics of photonic crystals with mirror symmetry [J]. *Journal of Guangxi University*, 2007, 32(4):326-328 (in Chinese).
- [19] LUO R H, LIANG R Sh, WEI Zh Ch, *et al.* Symmetrical structural one-dimensional photonic crystal super narrow-band filter with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10):1016-1018 (in Chinese).
- [20] LI T S, CHEN M S, SHU S. Research on photonic crystal filter of multi-peak underwater optical communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, 3(10):28-30 (in Chinese).
- [21] BORN M, WOLF E. *Principles of optics* [M]. 6th ed. New York: Pergamon, 1980:14-21.

(上接第 488 页)

些。增大入射角,对称结构光子晶体的透射峰迅速减小,因此,在设计窄带滤波器时应合理地选取入射角度。而非对称结构光子晶体禁带中心位置均向高频(短波)方向移动,且宽度变宽。当入射角为  $\pi/4$  时,在 2.5 倍频率处同样形成了一个新的光子禁带。以上的结论对于设计带阻滤波器和窄带滤波器具有理论指导意义。

#### 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] LAXMI S, PARMANAND M. Photonic band gap effect in one-dimensional plasma dielectric photonic crystals [J]. *Solid State Communications*, 2006, 138(3):160-164.