

文章编号: 0258-7025(2009)05-1105-06

# 一种具有放大功能的多通道窄带滤波器设计

杨 广 梁瑞生 罗仁华 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510006)

**摘要** 设计了传统介质(折射率为  $n_1 > 0$ )与激活介质(折射率  $n_2 = n_0 - ki$ )交替排列组成的一维光子晶体(PC)。利用传输矩阵法研究了这种光子晶体的透射光谱,模拟结果显示,  $n_1 = 1.45$ ,  $n_2 = 3.8 - 0.10i$  时会出现两条半峰全宽约 0.6 nm 获得增益的透射窄带,并且两条窄带的中心波长只与介质的厚度有关。用  $M \times N$  个厚度不同的此类光子晶体为单元设计了一种具有放大功能的  $M \times N$  阵列滤波器。研究了介质厚度和折射率的变化对滤波器通道透射窄带的影响。结果表明,此滤波器在可见光区域和红外光区域分别有  $M \times N$  个通道,并且通道间隔和窄带透射率的大小都可以通过改变介质参数任意调节,这为设计各种需要的滤波器提供了帮助。

**关键词** 光电子学; 光子晶体; 传输矩阵法; 滤波器; 激活介质

**中图分类号** TN713<sup>+</sup>.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1105

## Design of Multi-Channel Narrow Band Filter with Gain

Yang Guang Liang Ruisheng Luo Renhua Liu Songhao

(School for Information Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** A type of one-dimensional photonic crystal (PC) with traditional medium (refractive index  $n_1 > 0$ ) and active medium (refractive index  $n_2 = n_0 - ki$ ) alternant multilayer is designed. Its transmission spectrum is studied by transfer-matrix method. Simulation results show that it has two narrow transmission bands amplified whose half-width values are both about 0.6 nm with  $n_1 = 1.45$  and  $n_2 = 3.8 - 0.10i$ , and the corresponding central wavelengths are only up to the thickness of the medium. An  $M \times N$  matrix filter with gain is designed using  $M \times N$  PC units with different thickness. The affection of thickness and refractive index of the mediums on the channels of this filter is investigated. The results reveal that the spacing and transmittivity of the channels, which are located in region of visible and infrared light, could be adjusted by changing the parameters of mediums. This will help the needed filter design.

**Key words** optoelectronics; photonic crystal; transfer-matrix method; filter; active medium

## 1 引 言

自 1987 年光子晶体(PC)的概念被提出后,光子晶体一直是人们研究的热点。所谓光子晶体就是介电材料在空间上呈周期性排列的人工微结构,其晶格常数与工作光波长为同一数量级。光在这种周期性结构介质中传播时会有带隙形成,频率在禁带区域的光子是被禁止传播的。光子晶体具有光子频

率禁带,可以作为一个理想带阻滤波器。光子晶体滤波器是光子技术的基本元件之一,在光通信和光学信息处理方面有着广泛的应用,对光子晶体滤波器的研究已取得大量成果<sup>[1~3]</sup>。

文献[4]中把激活介质引入光子晶体,获得了放大的窄带。这种光子晶体具有滤波和放大信号的双重作用。本文用具有双通道滤波和放大功能的光子

收稿日期: 2008-04-24; 收到修改稿日期: 2008-08-27

基金项目: 国家 973 计划(2007CB307001)资助课题。

作者简介: 杨 广(1983—),男,硕士研究生,主要从事微纳器件中非线性光学效应、光子晶体等方面的研究。

E-mail: yangcheng0802@126.com

导师简介: 梁瑞生(1955—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息处理与微结构光学等方面的研究。

E-mail: liangrs@scnu.edu.cn

晶体作为元件, 组装设计了一种具有放大功能的新颖滤波器。这种滤波器不仅具有光放大作用, 而且该滤波器的通道间隔只与各个相邻光子晶体的介质膜厚度差有关, 对信号的放大程度与构成光子晶体的材料折射率有关, 这为滤波器的设计以及因节省了光放大器而减小器件的体积提供了有利的帮助。

## 2 物理模型及理论基础

如图 1 所示, 由两种不同介电常数材料的薄膜介质层交替排列构成一维光子晶体, 两种介质  $A, B$  的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 物理厚度均为  $d$ , 则 1 个周期晶格的光学厚度为  $d(n_1 + n_2)$ 。一束频率为  $\omega$  (波长  $\lambda$ ) 的光从左向右 ( $Z$  方向) 正入射该周期性介质。可用其传输矩阵表示在均匀介质膜的内部光的传播。假定介电常量  $\epsilon$ , 磁导率  $\mu$  和折射率  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ , 研究的所有介质都是非磁性的 ( $\mu = 1$ )。单层介质 TE 模的传输矩阵<sup>[5]</sup>为

$$\mathbf{M}(Z) = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n Z) & -i \sin(k_0 n Z) / p \\ -i p \sin(k_0 n Z) & \cos(k_0 n Z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $p = \sqrt{\epsilon/\mu}$ 。逐层应用(1)式, 可得多层介质膜的传输矩阵



图 1 光子晶体模型

Fig. 1 Model of one-dimensional photonic crystal

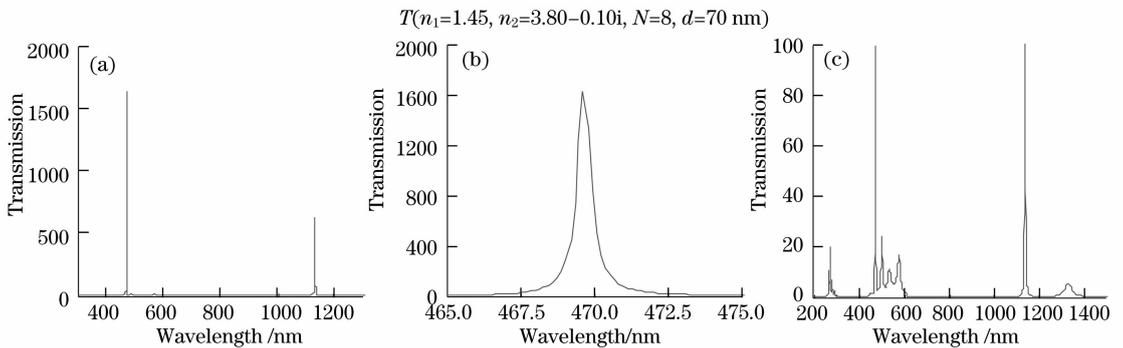


图 2  $d = 70$  nm 时的 (a) 透射光谱和 (b)  $\lambda = 469.66$  nm 处的横向放大图, (c) 为 (a) 的局部纵向放大图

Fig. 2 (a) Transmission spectrum, (b) horizontal zoom at  $\lambda = 469.66$  nm and

(c) vertical zoom partially of (a) with  $d = 70$  nm

当厚度  $d$  变化其他条件不变时, 发现透过的窄带位置也在变化。当  $d$  从 70 nm 间隔 5 nm 依次增加到 100 nm 时, 把 7 组透射谱在一个坐标系中画

$$\mathbf{M}(Z_N) = \mathbf{M}_1(Z_1)\mathbf{M}_2(Z_2 - Z_1)\mathbf{M}_3(Z_3 - Z_2)\cdots$$

$$\mathbf{M}_N(Z_N - Z_{N-1}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由此可以得到空气中 ( $\epsilon = 1, \mu = 1$ ) 整个系统的透射系数

$$t = \frac{2}{m_{11} + m_{12} + m_{21} + m_{22}}, \quad (3)$$

系统的透射率

$$T = |t|^2. \quad (4)$$

当  $n_1, n_2$  都为实数时, 此类一维光子晶体报道较多<sup>[6,7]</sup>。 $n_2$  为复数时, 若虚部为正, 则为损耗介质<sup>[8,9]</sup>, 若虚部为负, 则为激活介质, 对信号具有放大作用<sup>[4,10,11]</sup>。

## 3 数值模拟及分析

### 3.1 含有激活介质的光子晶体透射谱

介质  $A$  为传统介质, 折射率  $n_1 = 1.45$ , 介质  $B$  为激活介质, 折射率为复数  $n_2 = n_0 - ki$ , 取  $n_0 = 3.8$ ,  $k = 0.10$ , 厚度  $d = 70$  nm, 周期数  $N = 8$ 。模拟结果显示, 在中心波长  $\lambda_0 = 735$  nm 处, 两侧的可见光区域  $\lambda = 469.66$  nm 和红外光区域  $\lambda = 1137$  nm 处各有一个透射窄带, 半峰全宽约为 0.6 nm, 其中在  $\lambda = 469.66$  nm 处窄带的透射率约为 1630, 在  $\lambda = 1137$  nm 处约为 600, 两窄带相距 667.34 nm 如图 2(a), (b) 所示。这意味着它们分别被放大了 1630 倍和 600 倍, 由此可见此光子晶体对光信号具有放大作用。图 2(c) 为图 2(a) 的局部纵向放大图, 由此图可见, 得到放大的两窄带均位于光子禁带的边缘附近。

出, 如图 3 所示。当  $d$  线性增加时, 滤过的波长也是线性增加的, 这是由布拉格散射条件决定的。各窄带的透射率基本不变, 但同一厚度对应的两窄带间

隔在变化,并且是线性加宽。也就是说,当  $\Delta d$  一定时,短波一侧与长波一侧的窄带间隔恒定,但长波一侧的窄带间隔大于短波一侧的窄带间隔。由此可以想到把介质膜厚度  $d$  不同的光子晶体横向排列在一起,就组成一个多通道滤波器,这种滤波器在可见光区域和红外区域均有滤波和光放大作用,有望在光通信密集波分复用系统中得到应用。

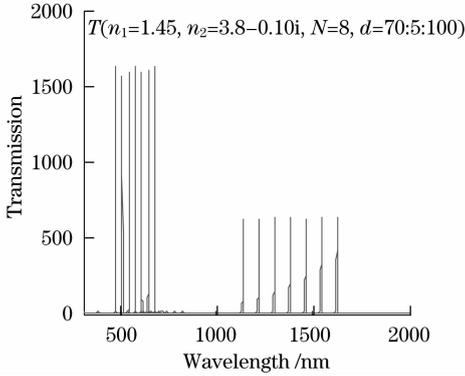


图 3  $\Delta d=5$  nm 时的透射光谱

Fig. 3 Transmission spectrum with  $\Delta d=5$  nm

### 3.2 具有放大功能的窄带滤波器的设计及特性分析

图 4 所示的是一个  $2 \times 5$  阵列滤波器,图中每个方格代表一个光子晶体单元的横截面。这是一个在长波段和短波段各有 10 个通道的滤波器。

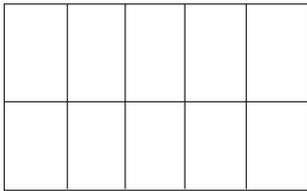


图 4 由光子晶体组成的  $2 \times 5$  阵列滤波器

Fig. 4  $2 \times 5$  matrix filter composed of photonic crystal

#### 3.2.1 $M \times N$ 阵列的滤波器信道间隔 $\Delta\lambda$ 随 $\Delta d$ 的变化

图 5 为  $M \times N$  阵列滤波器通道间隔  $\Delta\lambda$  与光子晶体厚度差  $\Delta d$  的关系曲线。图中虚线为短波一侧关系曲线,实线为长波一侧关系曲线。由图 5 可知,  $M \times N$  阵列滤波器通道间隔  $\Delta\lambda$  与光子晶体厚度差  $\Delta d$  为线性关系。短波一侧透过波长的变化  $\Delta\lambda$  与介质厚度变化  $\Delta d$  之间的关系

$$\Delta\lambda = 6.71 \times \Delta d, \tag{5}$$

若以  $d=70$  nm,  $\lambda=469.66$  nm 为基准,则有

$$\lambda - 469.66 = 6.71 \times (d - 70), \tag{6}$$

即

$$\lambda = 6.71d - 0.04. \tag{7}$$

对于长波一侧的情况,与短波一侧的推导过程相似,由图 5 实线可知  $\Delta\lambda' = 16.25 \times \Delta d$ ,并以  $d=70$  nm,  $\lambda'=1137$  nm 为基准,可得长波一侧的通道位置与介质厚度  $d$  的关系式

$$\lambda' = 16.25d - 0.50. \tag{8}$$

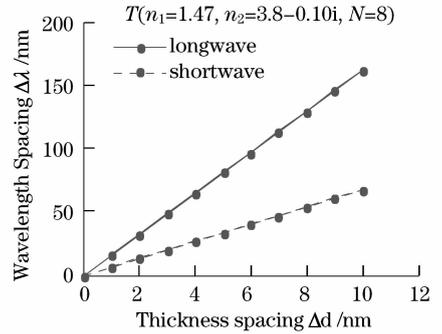


图 5  $\Delta\lambda - \Delta d$  的关系曲线

Fig. 5 Relation of  $\Delta\lambda - \Delta d$

#### 3.2.2 $M \times N$ 阵列滤波器透射谱随折射率的变化

相对于  $n_1=1.45, n_2=3.8-0.10i, N=8$ ,光子晶体介质膜厚度  $d$  从 70 nm 间隔 5 nm 依次递增到 100 nm 的透射光谱图(图 3)。  $n_1$  变化时,通道间隔不变。但  $n_1$  变大时,短波一侧各通道窄带透射率增大,增量不同如图 6(a)所示,长波一侧却同步减小如图 6(b)所示。反之,短波一侧各窄带透射率同步减小,长波一侧同步增大,但增大的速度要比短波减小的速度小得多,如图 7 所示。由图 7(c)可知,当  $n_1=1.4379$  时,两侧通道窄带等高约 800。由此可见  $n_1$  越大,短波一侧通道窄带透射率越大,长波一侧越小。

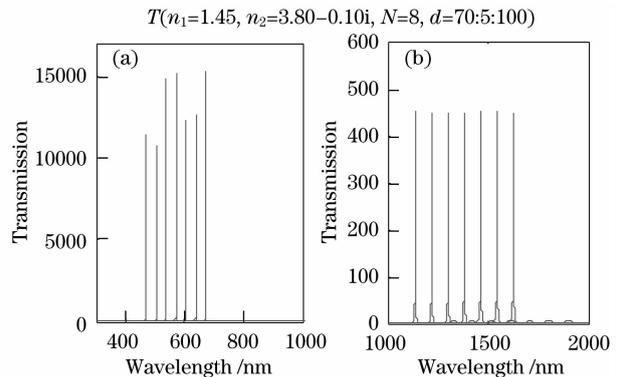
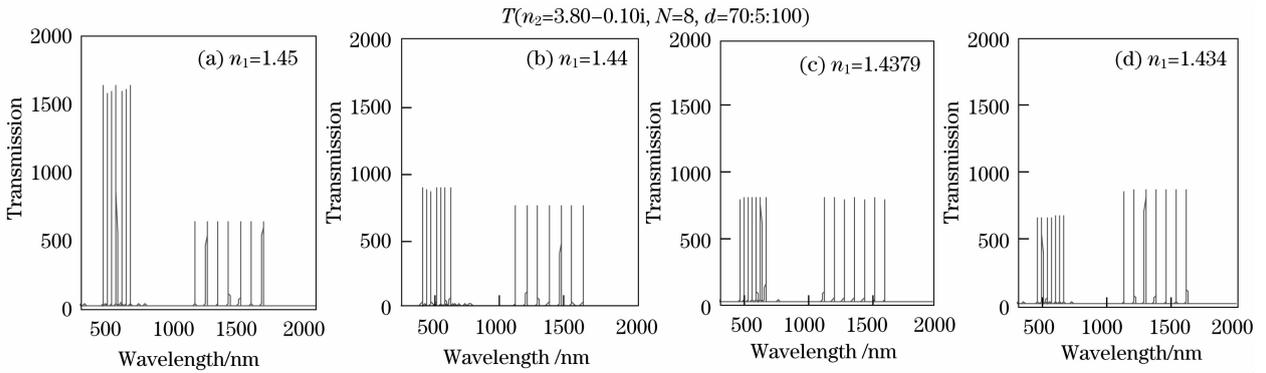


图 6  $n_1=1.47$  时的透射光谱

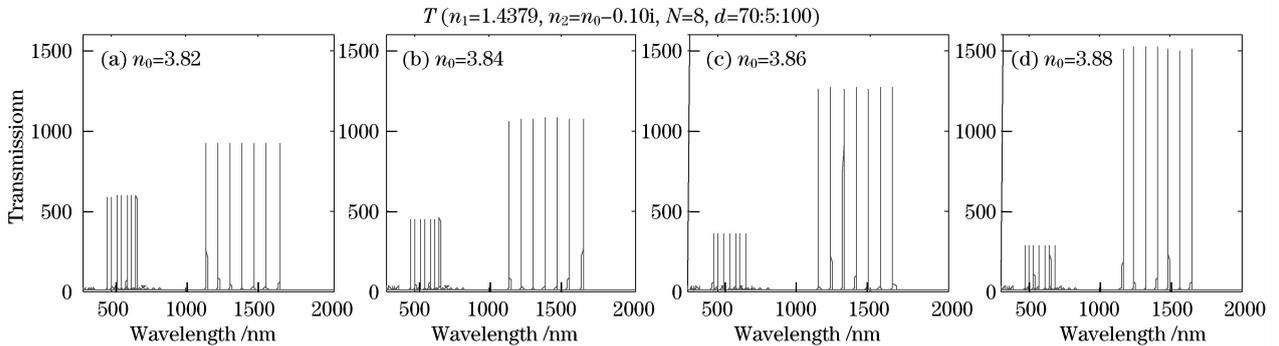
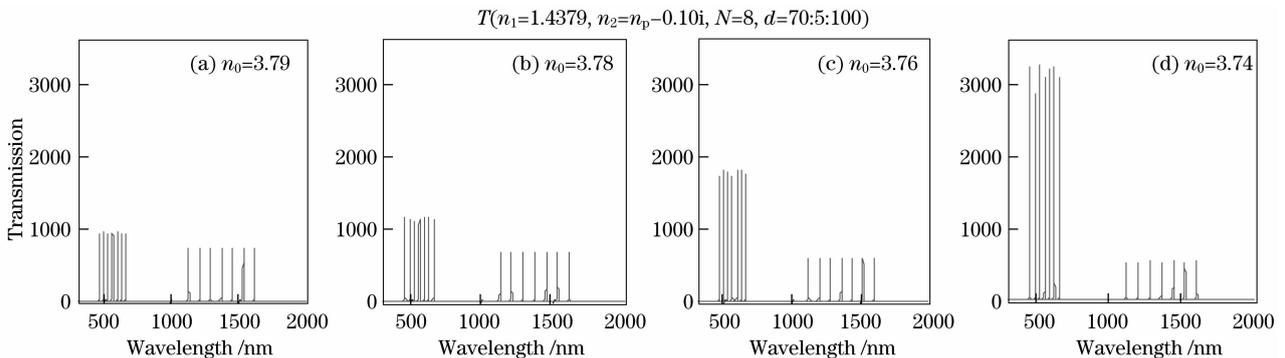
Fig. 6 Transmission spectrum with  $n_1=1.47$

当  $n_2$  变化时,各通道间隔依然不变,但  $n_0$  的变化对各通道窄带透射率的影响与  $n_1$  恰恰相反。  $n_0$  变大时,短波一侧各通道窄带透射率同步减小,长波一侧同步增大,如图 8 所示。反之,短波一侧各通道

图 7  $n_1$  不同时的透射光谱Fig. 7 Transmission spectrum with different  $n_1$ 

窄带透射率同步增大,长波一侧同步减小,如图 9 所示。也就是说, $n_0$  越大短波一侧通道窄带透射率越小,长波一侧越大。当  $k$  变大时,两侧通道窄带透射率均减小,尤其是短波一侧急剧减小,如图 10(a) 所示。当  $k$  变小时,同样会导致两侧窄带透射率减小,同时会出现非窄带杂乱的光谱,伴有较多的噪声,如图 10(b) 所示。介质折射率对滤波器透射谱的影响

可以归结为:介质折射率的变化对通道间隔没有影响,只对各通道窄带的透射率有影响。 $n_0$  与  $n_1$  的比值越大,短波一侧通道窄带透射率越小,长波一侧越大,但透射率超过 2000 时,窄带透射率变化的同步性比较差,如图 6(a),图 9(d) 中短波一侧窄带不再等高。激活系数  $k=0.10$  时,滤波器各通道窄带透射率取得最大值。

图 8  $n_0$  增大时的透射光谱Fig. 8 Transmission spectrum when  $n_0$  bigger and bigger图 9  $n_0$  减小时的透射光谱Fig. 9 Transmission spectrum when  $n_0$  smaller and smaller

### 3.3 结果分析

光子晶体中介质的折射率在空间形成周期性的排列,当电磁波在其中传播时,受不同介质交界面布

拉格散射的影响,会使某些频率的电磁波受到抑制而不能传播,从而在光子晶体中形成带隙。当光照射光子晶体时,由于光场与原子的相互作用,会使光

子晶体中的原子发生自发辐射。若自发辐射的光频率恰好落在光子晶体的带隙中,自发辐射相当于被禁止,由于自发辐射强度与对应频率的光子态密度成正比,所以自发辐射被禁止时,态密度为零。当态密度增大时,自发辐射的强度也会增大。当在光子晶体中引入激活介质后,在强光或电流激励下,会得到品质因子非常高的杂质态,使某些能级的态密度大大提高,从而使自发辐射增强。同时,在光子晶体中也会形成受激辐射,并且受激辐射发生在带隙的边缘附近。这是因为在带隙边缘附近电磁波受到强烈的局域场的作用,使得此处电磁波的群速度异常并且变得非常小甚至接近于零。而在光子晶体中传播的电磁波的群速度与其对应的态密度成反比<sup>[10]</sup>,所以在光子晶体禁带边缘附近有非常大的态密度,这也是由于低能级电子从抽运源中吸收能量跃迁到高能级所致,当原子受激辐射时,光将得到放大,所以在禁带边缘附近光的透射率远远大于1。利用这些特征可以控制光的输运过程,使绝大部分光能量集中在所需要的波段,在高增益的光通信系统中得到应用。至于被放大的部分位于禁带的长波边缘还是短波边缘以及禁带的位置,与介质的厚度和折射率的分布有关<sup>[10,11]</sup>。当厚度  $d$  变化时,受布拉格散射影响,禁带位置会发生移动,所以透射窄带位置随着  $d$  的变化而变化。当  $n_1, n_2$  变化时,电磁波在光子晶体中传播时受到的局域场的影响也在变化,并且对不同频率的电磁波群速度影响不同,也就是对不同频率光的放大程度不同,所以短波一侧和

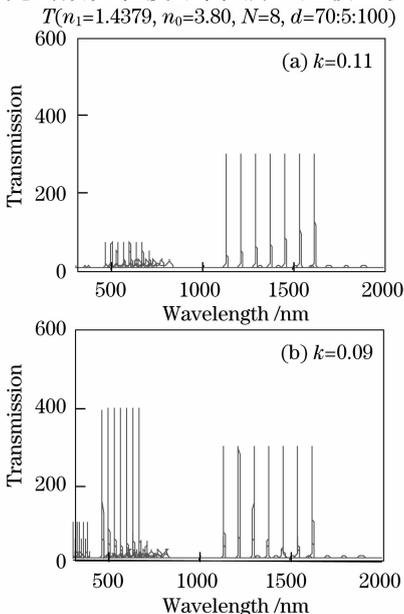


图 10  $k$  不同时的透射光谱

Fig. 10 Transmission spectrum with different  $k$

长波一侧通道窄带透射率变化不相同。当  $n_0$  与  $n_1$  比值增大时,会导致短波处的电磁波群速度增大而长波处减小,使得短波一侧通道窄带透射率减小,长波一侧增大。反之,则会导致短波处的电磁波群速度减小而长波处增大,使得短波一侧通道窄带透射率增大,长波一侧减小。但  $n_1, n_2$  的变化对电磁波群速度影响的物理机制还有待研究。

## 4 结 论

将传统介质(折射率为  $n_1$ )与激活介质(折射率  $n_2 = n_0 - ki$ )按周期性排列组成周期数  $N=8$  的一维光子晶体,发现此光子晶体具有双通滤波和光信号放大作用。当光子晶体的介质膜厚度线性变化时,滤过的窄带位置也是线性变化的,只是长波一侧的窄带变化更大一些。但两侧窄带的透射率保持不变。根据模拟图,给出了透过的窄带中心波长与介质膜厚度的关系式。基于光子晶体的这些特性,设计组装了一种  $M \times N$  阵列具有放大功能的滤波器。并对两种介质折射率与两侧通道光增益的变化关系进行了研究,利用电磁波的群速度与其对应态密度成反比的关系,解释了出现高增益的透射窄带的原因。但光子晶体中介质折射率的变化对不同频率电磁波的群速度影响的深层次原因有待进一步研究。

由于此类光子晶体的特性,可以根据需要方便地组装设计各种波段、通道间隔、一定放大倍数的滤波器。因其具有光信号放大的功能,在通信系统或光信息处理系统中能够节省大量的光放大器,这对减小器件的体积和提高系统的性能具有现实的价值。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Bin, Wang Qingkang. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8):1208~1214  
吴 斌,王庆康.带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8):1208~1214
- 2 Jiang Yurong, Song Yuting, Xue Wei. Multi-channel filter based on defects coupled in one-dimensional photonic crystal [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(2): 143~146  
蒋玉蓉,宋玉婷,薛 唯.一维光子晶体多缺陷耦合的多通道滤波[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(2):143~146
- 3 Wang Li, Sang Tian, Shen Zhengxiang. Spatial separation-filtering realized by using one-dimensional photonic crystals with defects[J]. *Optical Instruments*, 2006, **28**(4): 52~55  
王 利,桑 田,沈正祥.具有缺陷的一维光子晶体空间滤波器[J]. *光学仪器*, 2006, **28**(4): 52~55
- 4 Tang Bingshu, Wang Gang, Shen Tinggen. Design of supernarrow band-pass filter of one-dimensional photonic crystal in negative refractive activity medium[J]. *Laser & Infrared*,

- 2008, **38**(1):84~87
- 汤炳书,王 刚,沈廷根. 负折射激活介质一维光子晶体超窄带滤波器研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(1):84~87
- 5 Born Max, Wolf Emil. Principles of Optics [M]. 7thed. New York; Cambridge, 1999. 60~62
- 6 Li Zhiqian, Tian Xiuxian, Zhu Dandan. The investigation for filter properties of the one-dimensional three sects photonic crystal with symmetrical structure[J]. *Optoelectronic Technology*, 2007, **27**(3):145~151
- 李志全,田秀仙,朱丹丹. 对称结构的一维三元光子晶体滤波特性的研究[J]. 光电技术, 2007, **27**(3):145~151
- 7 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1695~1699
- 张文富,方 强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. 光学学报, 2007, **27**(9):1695~1699
- 8 Hu Jie, Chen Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):567~572
- 胡 婕,陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(4):567~572
- 9 Wang Hong, Ouyang Zhengbiao, Han Yanling *et al.*. Optical properties and mode tuning of defect modes in one-dimensional photonic crystal micro-cavity containing dispersive medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):940~945
- 王 宏,欧阳征标,韩艳玲等. 含色散介质的一维光子晶体微腔的光学特性和模式调节[J]. 光学学报, 2007, **27**(5):940~945
- 10 Zhenghua Li, Tinggen Shen, Xuehua Song. Study on optical gain of one-dimensional photonic crystals with active impurity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12):696~699
- 11 Shen Tinggen, Wu Bingjian, Fang Mingyang. Study on the optical gain of photonic crystals with active impurity [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2006, **35**(2):332~336
- 沈廷根,吴炳坚,方明阳. 光子晶体中掺杂激活杂质的光增益研究[J]. 人工晶体学报, 2006, **35**(2):332~336