

# 缺陷态复周期光子晶体的特性研究\*

崔应留<sup>1</sup> 蔡祥宝<sup>2, \*\*</sup>

(1 南京邮电学院应用数理系, 南京 210003)

(2 南京邮电学院应用数理系, 南京大学固体微结构实验室, 南京 210093)

**摘要** 利用传输矩阵法计算复周期结构的光子晶体的色散关系和滤波特性, 并重点研究了含有缺陷的类似于谐振腔结构的光子晶体滤波特性. 由于这种缺陷态复周期结构的可调参数多, 人们很容易得到在红外波段 1550 nm 附近窄带滤波窗口, 透过率可达到近 90%, 而窗口以外的透过率在 0.02% 以下. 当改变中间夹层厚度、周期数及缺陷层数时, 窄带滤波窗口的位置和带宽发生改变. 因此, 它在高速、长距离光通信中将有很好的应用.

**关键词** 光子带隙; 光子晶体; 窄带滤波器; 缺陷  
**中图分类号** O437+.1 **文献标识码** A

## 0 引言

光子晶体是一种介电常数呈周期性分布的人工介质结构. 它的最主要特性是具有光子带隙, 频率和能量处于禁带内的光子在光子晶体内部是被禁止的, 所以它在许多方面有着广泛的应用价值<sup>[1~4]</sup>, 如可制作光子晶体滤波器, 光开关, 光混频器, 光倍频器; 可以制作高 Q 值的微腔, 光子晶体光纤, 光子晶体微波天线和光子晶体光纤延迟线, 可以制作光子晶体棱镜, 光无源二极管和激光器等等<sup>[5,7]</sup>. 为了计算光子晶体的色散关系, 本文将采用传输矩阵法<sup>[6]</sup>来进行数值计算, 描述 EM 波光子晶体构中传输特性. 对于一维光子晶体材料, 一个周期中含两层不同折射率和厚度的介质结构, 许多人已经进行过深入研究<sup>[9,10]</sup>. 在此, 我们将提出一种一维三层 (1D3C) 介质的新型光子晶体结构, 即一个周期中含三个不同折射率和厚度周期性结构. 由于它含有多个可调参数, 我们很容易通过改变结构参数而获得很好的滤波效果. 采用转移矩阵法, 研究了它的色散关系和传输特性, 发现它具有非常好的带隙结构特性, 同时在周期性结构中掺杂某种不同介质, 破坏其周期性, 成为具有缺陷的光子晶体, 它的光子带隙中就有缺陷态, 利用这种缺陷态, 就可获得窄带滤波特性, 进而可以制成一些光学器件, 应用于高速、长距离光通信方面.

## 1 理论分析

图 1 为一维三层介质的周期性光子晶体结构,

三层介质的折射率分别是  $(n_1, n_2, n_3)$ , 厚度分别为  $(d_1, d_2, d_3)$ , 介电常数分别是  $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ , 磁导率分别为  $(\mu_1, \mu_2, \mu_3)$ , 其中  $n_i = \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$ , 图 2 为具有缺陷态的一维三层介质的光子晶体结构, 缺陷层厚度为  $d_2'$ .

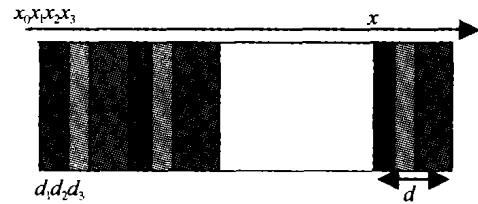


图 1 一维三层介质的光子晶体结构

Fig. 1 The one-dimensional three-component PBG's structure

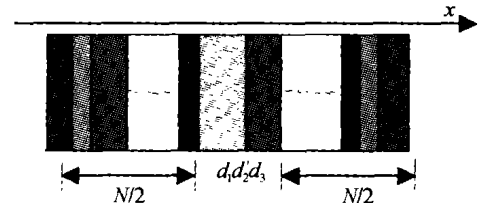


图 2 具有缺陷的一维三层光子晶体结构

Fig. 2 The 1D3C PBG's structure with a defect

对于无限周期性结构, 布鲁赫 (Bloch) 理论应用于麦克斯韦方程中去, 经过一定的代数计算, 得到色散关系

$$\begin{aligned} \cos(kd) &= \cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot \\ &\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_3}{\epsilon_3\mu_2}} + \sqrt{\frac{\epsilon_3\mu_2}{\epsilon_2\mu_3}}\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\epsilon_3\mu_1}{\epsilon_1\mu_3}} + \sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_3}{\epsilon_3\mu_1}}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_2}{\epsilon_2\mu_1}} + \sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_1}{\epsilon_1\mu_2}}\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) \quad (1) \end{aligned}$$

式中  $k$  是布鲁赫波矢量,  $\omega$  是光波的频率,  $c$  等于光速,  $(d_i, n_i, \epsilon_i, \mu_i)$  分别是第  $i$  层的厚度和折射率, 介

\*江苏省自然科学基金资助课题 (No. BK2002 202), 南京大学固体微结构物理实验室资助课题 (No. M021711)

\*\*Tel: 025-3431423 Email: cuiying1106.student@sina.com

收稿日期: 2003-04-16

电常数及磁导率( $i=1,2,3$ ),  $d=d_1+d_2+d_3$ .

下面我们首先考虑一均匀介质层( $\epsilon_i, \mu_i$ ), 设平面波(如 TE 波)沿  $\chi$  方向传播, (即从  $\chi=\chi_0$  或  $\chi_1, \chi_2$  到  $\chi=\chi_1$  (或  $\chi_2, \chi_3$ ) 传播), 根据传输矩阵法可得波传输方程

$$\begin{pmatrix} E_y(x) \\ H_z(x) \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E_y(0) \\ H_z(0) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中传输矩阵

$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right) & i\sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right) \\ i\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right) & \cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

同理可写出第 2, 3 层介质的传输矩阵  $M_2(x_2-x_1)$  和  $M_3(x_3-x_2)$  因而不难得到对应一个复合周期的转移矩阵

$$M(d) = M(d_3)M(d_2)M(d_1) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$m_{11} = \cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_3}{\epsilon_3\mu_2}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_3}{\epsilon_3\mu_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_2}{\epsilon_2\mu_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right)$$

$$m_{12} = i\left(\sqrt{\frac{\mu_3}{\epsilon_3}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) + \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_1\mu_3}{\epsilon_1\mu_2\epsilon_3}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right))$$

$$m_{21} = i\left(\sqrt{\frac{\epsilon_3}{\mu_3}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) + \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) + \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\mu_2}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) - \sqrt{\frac{\epsilon_1\mu_2\epsilon_3}{\epsilon_2\mu_1\mu_3}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right) \cdot$$

$$\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right))$$

$$m_{22} = \cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_3\mu_2}{\epsilon_2\mu_3}}\cos\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_3\mu_1}{\epsilon_1\mu_3}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right) -$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_1}{\epsilon_1\mu_2}}\sin\left(\frac{\omega}{c}n_1d_1\right)\sin\left(\frac{\omega}{c}n_2d_2\right)\cos\left(\frac{\omega}{c}n_3d_3\right)$$

如果是周期性结构, 周期为  $N$ , 则  $N$  层周期结构的转移矩阵可表示为

$$M(Nd) = M^N(d) =$$

$$\begin{pmatrix} m_{11}U_{n-1}(x) - U_{x-2}(x) & m_{12}U_{n-1}(x) \\ m_{21}U_{n-1}(x) & m_{22}U_{n-1}(x) - U_{x-2}(x) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中  $x = \frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) \cdot U_n(x)$  而是第二类切比雪夫

多项式:  $U_n(x) = \frac{\sin[(n+1)\cos^{-1}(x)]}{\sqrt{1-x^2}}$ . 如果不是周

期性结构, 引入缺陷, 则图(2)的转移矩阵可表示为

$$M(L) = M^{\frac{N}{2}}(d)M(d')M^{\frac{N}{2}}(d) \quad (6)$$

$L$  为结构的总长度, 另外根据费涅尔衍射定理, 通过解麦克斯韦方程得出其透射函数和反射函数

$$t = \frac{2\sqrt{\epsilon_1/\mu_1}}{(M_{11} - \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{12})\sqrt{\epsilon_1/\mu_1} + (-M_{12} + \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{22})};$$

$$r = \frac{-(M_{11} + \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{12})\sqrt{\epsilon_1/\mu_1} + (M_{21} + \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{22})}{(M_{11} - \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{12})\sqrt{\epsilon_1/\mu_1} + (-M_{21} + \sqrt{\epsilon_1/\mu_1}M_{22})};$$

式中  $\epsilon_1, \mu_1$  和  $\epsilon_N, \mu_N$  分别为第一层和最后一层介质的介电常数和磁导率.

## 2 数值计算和讨论

由式(1), 若选取  $n_1, n_2, n_3$  分别等于 1.428, 2.562 和 1.654,  $d_1, d_2, d_3$  分别, 0.25d, 0.5d. ( $d = \lambda_0, \lambda_0$  为人射波中心波长), 则色散关系曲线如图 3. 由图可知禁带的存在, 在  $0.5 < \omega/\omega_0 < 0.70$  存在第一个禁带, 第二个禁带存在于  $1.2 < \omega/\omega_0 < 1.4$ , 等等( $\omega_0$  为中心圆频率,  $k$  为波矢). 与其相对应, 可画出传输函数的透射谱和反射谱, 如图 4(a) 和 (b),

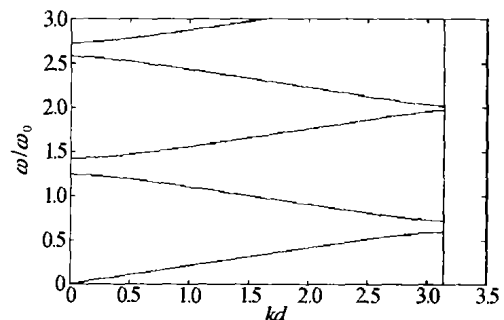


图 3 复周期光子晶体结构的色散关系曲线  
Fig. 3 The dispersion curves of PBC's structure

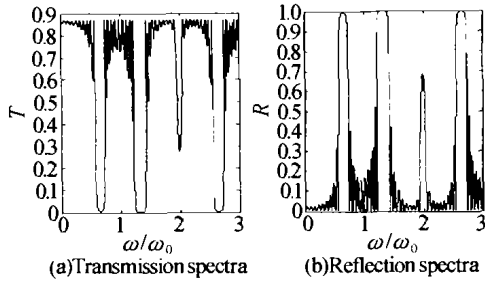


图4 复周期光子晶体结构传输谱  
Fig. 4 The transmission spectra of PBG's structure

$T$ 为传输谱的透射率, $R$ 为传输谱的反射率。 $T=0$ 的地方为禁带,在此处传输模式,自发辐射和零点振动都不存在了。

下面我们重点来研究在该结构中引入缺陷时(形成缺陷态)产生的一些光学特性.在图2中,令 $d_2 = 0.75d$ ,则在原来禁带区出现一些窄的透过窗口,选取 $\lambda_0 = 1000\text{ nm}$ ,在 $1550\text{ nm}$ 附近出现很窄的峰值,其半功率的透过窗口为 $1.2\text{ nm}$ ,无疑应用于DWDM系统将产生很好的效果,如图5(a),同时图5(b)和5(c)分别给出当 $d_2 = 0.65d$ 和 $d_2 = 0.85d$ 时的情况,可看出 $d_2$ 越大,窄带滤波窗口向长波长区移动.图6给出了不同 $N$ 时,对窄带滤波特性的影响.由图可知, $N$ 改变,滤波窗口位置几乎不变,但 $N$ 越大,透过率越小,透过窗口宽度越小.我们还研究了当 $d$ 变化时对滤波特性的影响. $d$ 越大,峰值向长波长区移动,反之峰值向短波长区移动.图7给出了当不改变夹层的宽度,即 $d_2$ 不变, $n_2$ 变化时对滤波特性的影响.由图可知, $n_2$ 变化时,缺陷模透过率几乎不变,但其频率位置发生了明显的改变,随着 $n_2$ 增大,缺陷模向长波长区移动.至此,我们已经知道结构的中间只含一个缺陷层时,在 $1550\text{ nm}$ 禁带区出现一个缺陷模,如图8(a).很自然想到如果在该结构的中间加入多个缺陷层,定会产生重要的光学特性.当 $n_2$ 用 $n_4 n_2 n_4$ 来代替时,如图8(b),出现两个窄带滤波窗口,其中 $n_4 = 2.4, d_4 = 0.65d$ 如果缺陷层为 $n_4 n_2 n_5 n_2 n_4$ 时,如图8(c),在禁带区出现三个窄带滤波窗口,其中 $n_5 = 4.4, d_5 = 0.75d$ 可以得出,当加入不同的缺陷层数时,在禁带区会出现个

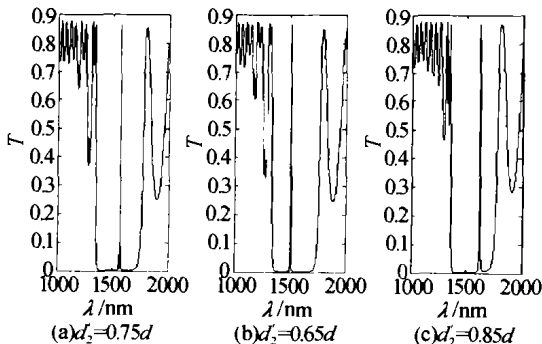


图5 缺陷态复周期光子晶体的滤波特性  
Fig. 5 The filtering property of structure

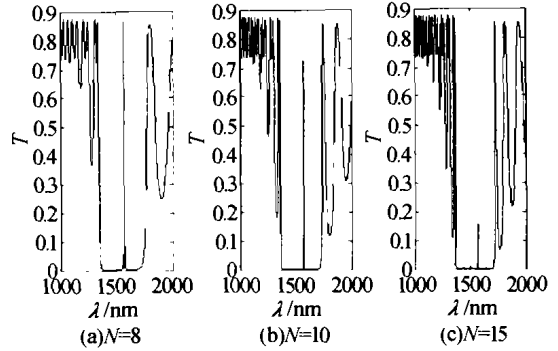


图6  $N$ 不同的情况  
Fig. 6 The influence of the number of periods

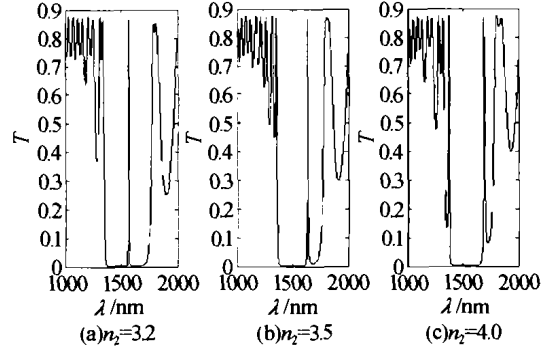


图7  $n_2$ 的大小对滤波特性的影响  
Fig. 7 The influence of the  $n_2$

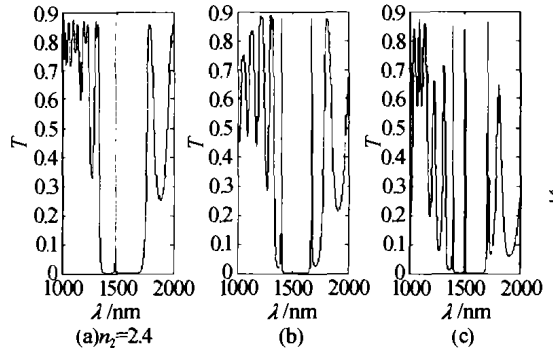


图8 缺陷层数对滤波特性的影响  
Fig. 8 The influence of the number of defects

数不同缺陷模.利用这一特性,可以制成多波长窄带滤波器,应用于DWDM通信系统.

上面我们主要讨论了缺陷态复周期光子晶体的特性,它的滤波特性与在普通均匀周期结构光子晶体中加入缺陷获得的滤波特性相似,都是在禁带中存在窄带透光窗口.只是复周期结构透射率小于普通均匀光子晶体的透过率(99.99%).但在普通均匀周期结构光子晶体中加入缺陷获得的超窄带滤波窗口,由于透过窗口太窄(约为 $0.0001\text{ nm}$ ),即使在DWDM系统中也是没有实际意义的.而在缺陷态复周期结构中,通过适当调整多个参数,可以获得具有工程应用价值的滤波特性,同时还能通过增加缺陷层数,制成多波长滤波器.当然缺陷态复周期结构光子晶体制备上要复杂些.

### 3 结论

本文研究了一维三层介质的光子晶体结构的色

散关系和滤波特性,由于可调参数较多,因而很容易控制其带隙区域,当引入缺陷时,在其带隙处出现窄的峰值窗口,体现了很好的滤波特性,在 DWDM 光通信技术中具有重要的应用价值.

### 参考文献

- 1 Fan S, Winn J N, Devenya, Chen J C, *et al.* Guided and defect modes in periodic dielectric waveguides. *J Opt Soc Am (B)*, 1995, **12**(7): 1267 ~ 1272
- 2 Kurizki G, Haus J W. Photonic band structure. *J Modern Opt*, 1994, **41**(2): 171 ~ 173
- 3 Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N. Photonic Crystals, NJ: Princeton Univ. Press, 1995. 45 ~ 104
- 4 Urso B D, Painter O, Brien J O, *et al.* Modal reflectivity in finite-depth tow-dimensional photonic crystal microcavities. *J Opt Soc Am (B)*, 1998, **15**(3): 1155 ~ 1159
- 5 Dowling J P, Scalora M, Bloemer M J, *et al.* The photonic band edge laser: a new approach to gain enhancement. *J Appl Phys*, 1994, **75**(4): 1896 ~ 1899
- 6 曹庄琪. 导波光学中的转移矩阵方法. 上海: 上海交通大  
学出版社, 2001. 30 ~ 42
- 7 Cao Z Q. Transfer matrix method in Optical waveguide. Shanghai: Press of Shanghai Jiaotong University, 2001. 30 ~ 42
- 7 Chen Y B, Cai X B, Zhu Y Y, *et al.* Second harmonic generation in tow dimensional photonic band gap materials. *J Appl Phys*, 2002, **92**(6): 2969 ~ 2973
- 8 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器. 光子学报, 2002, **31**(3): 281 ~ 284
- 9 Ouyang Z B, Liu H S, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(3): 281 ~ 284
- 9 Baba T, Fukaya N, Yonekura J. Observation of light transmission in photonic crystal waveguides with bends. *Electron Lett*, 1999, **35**(8): 654 ~ 655
- 10 符李渊, 欧阳征标, 等. 复周期结构光子晶体的能带特性研究. 光电子·激光, 2002, **13**(2): 139 ~ 141
- 11 Fu L Y, Ouyang Z B, *et al.* *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(2): 139 ~ 141

## The Properties of Defect States of the Multi Periods of Photonic Crystal

Cui Yingliu<sup>1</sup>, Cai Xiangbao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Optical Information Technology, Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing 210003

<sup>2</sup> Department of Applied Mathematics and Physics, Nanjing University of Post and Telecommunication,  
National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093

Received date: 2003-04-16

**Abstract** The optical dispersion relation and the filtering properties on one-dimensional three component photonic crystal, especially the filtering properties of the photonic crystal with a defect layer have been studied by the transfer matrix method. Owing to its more adjustable parameters, the people can easily obtain narrow band transmission window at 1550 nm. The transmission can get to 90% inside the window, but only 0.02% outside the window. The width and the position of the window changes with the thickness of the defect layer, the number of periods and the number of defect layers. So it will have good application in the high-speed and long-range optical communication.

**Keywords** Photonic band gap; Photonic crystal; Narrow band filter; Defect



**Cui Yingliu** was born on Sept. 22, 1974 in Liuan, Anhui Province. Now he is the postgraduate of Nanjing University of Posts and Telecommunications. His specialty is the optical communication, his research interests include nonlinear optics, communication and information processing.