

一维光子晶体的缺陷模特性研究

陈宪锋¹ 沈小明¹ 蒋美萍¹ 倪重文¹ 是度芳^{1,2}

(1 江苏工业学院信息科学系,常州 213016)

(2 华中科技大学物理系,武汉 430074)

摘 要 利用传输矩阵法研究了缺陷层有吸收的一维光子晶体的带隙结构,在中心波长附近利用泰勒展开式的一级近似得到了缺陷模的高度和半峰全宽的计算公式. 研究发现,消光系数、介质周期数和缺陷层厚度对缺陷模高度的影响较大,它们的增大均使缺陷模高度快速下降;而对半峰全宽的影响主要取决于介质的周期数,随周期数的增大缺陷模快速变窄.

关键词 光子晶体;缺陷模;传输矩阵;消光系数

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

0 引言

从 Yablonovitch 和 John 分别在 1987 年提出光子晶体的概念以来^[1,2],人们对光子晶体进行了广泛地研究. 光子晶体的最根本的特征是具有光子带隙^[1] (PBG; photonic band gap),落在带隙中的电磁波被禁止传播. 光子晶体的这一特性使得它在许多方面有着重要的应用,如光子晶体光纤^[3]、光子晶体波导^[4]、全向反射镜^[5]、光子晶体滤波器^[6]、光子晶体偏振器^[7]等. 在光子晶体中引入缺陷,可使光子局域化^[8,9]. 利用掺杂光子晶体来抑制或增强自发辐射,可以制造高效率 and 零阈值的激光器^[10]、高品质的激光谐振腔^[11]、以及高效发光二极管^[12]等. 特别是缺陷层为具有 Kerr 效应的非线性介质时,还可以使系统在光学响应中出现双稳态^[13]、多稳态^[14]及光学限制^[15]等特性. 因此有必要了解缺陷层对光子晶体能带结构的影响,了解缺陷模的有关特性,这对光子晶体的制作和应用很有帮助.

有缺陷层一维光子晶体的缺陷模特性,目前已有的一些相关的报道^[16~18],但他们只给出了缺陷模的数值计算结果. 本文对此进行了更广泛深入的研究,在缺陷层中引入了吸收介质,得到了缺陷模高度和半峰全宽的理论公式,并进行了缺陷模特性的研究.

1 模型与数值计算结果

1.1 模型与计算方法

带缺陷的一维光子晶体是由两种折射率分别为 n_1 和 n_2 的不同材料 A、B 交替构成,中间 D 为缺陷层,如图 1. 缺陷层 D 两侧的周期单元 (AB 或 BA) 数为 N ,每个周期单元中各介质层均为 $\lambda_0/4$ 片,即 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, λ_0 为中心波长;缺陷层的折射率

为 n ,消光系数为 κ ,物理厚度 $d = \frac{\lambda_0}{4n} \times m$. 该一维光子晶体的结构简写为 $(AB)^N D^m (BA)^N$.

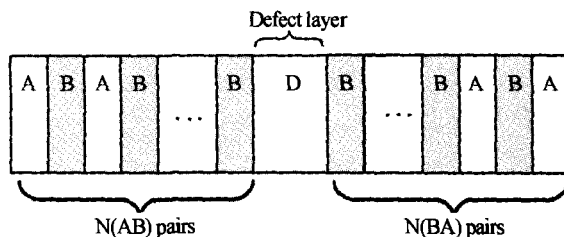


图 1 一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的结构
Fig. 1 Structure of an 1D photonic crystal $(AB)^N D^m (BA)^N$

当光波入射到光子晶体时,可以利用传输矩阵^[19]来进行透射谱的研究.

每一个介质层的特征矩阵为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$, $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot n_j \cos \theta_j$ (TE) 或

$$\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{n_j}{\cos \theta_j} \text{ (TM)}$$

对于有吸收的缺陷层结构,在上述传输矩阵中,折射率用复折射率 $\tilde{n} = n - i\kappa$ 代入. 整个一维光子晶体的总传输矩阵为

$$M = (M_A M_B)^N M_D (M_B M_A)^N = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (2)$$

光子晶体的透射率

$$T = \frac{4n_0 n_g}{|n_0 a + n_0 n_g b + c + n_g d|^2} \quad (3)$$

式中 n_0 、 n_g 为光子晶体的外侧介质折射率.

1.2 数值计算结果

利用上述方法研究了一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的带隙结构. 计算中有关参数为: 介质 A 为 MgF_2 , $n_1 = 1.38$ 、 $d_1 = 0.281 \mu m$, 介质

B 为 ZnS, $n_2 = 2.35$, $d_2 = 0.165 \mu\text{m}$, 中心波长 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, 缺陷层的折射率 $n = 1.5$, 晶体外侧的介质同是空气 $n_0 = n_g = 1$. 光波正入射到光子晶体上, TE 模和 TM 模的传播特性是一致的.

图 2 表示一维光子晶体 $(AB)^5 D^m (BA)^5$ 的透射谱. 其中图 2(a) 为缺陷层厚度 $d = \frac{\lambda_0}{4n} \times m, m=1$, 且缺陷层无吸收时的透射谱; 图 2(b) 中计及缺陷层的吸收, 消光系数 $\kappa = 0.003$, 但缺陷层的厚度不同, 虚线表示 $m=1$ 、实线表示 $m=2$ 时的透射谱. 可以发现, 当缺陷层的光学厚度为 $\lambda_0/4$ 时, 缺陷层的有限吸收基本上不改变光子晶体的透射特性; 但当缺陷层厚度改变时, 透射特性将出现明显的变化, 不仅禁带展宽, 且在晶体 $(AB)^5 D^2 (BA)^5$ 的禁带中心出现了很尖锐的缺陷模.

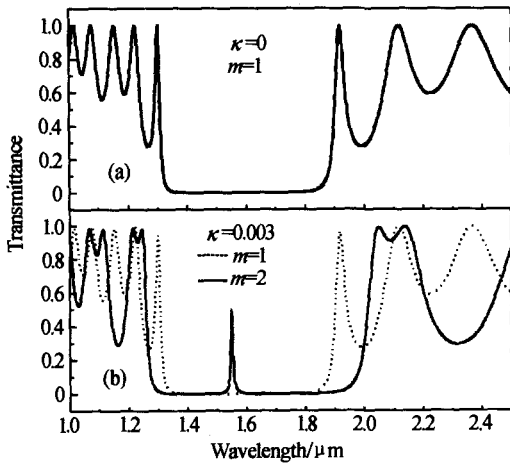


图 2 一维光子晶体 $(AB)^5 D^m (BA)^5$ 的透射谱
Fig. 2 Transmission spectra of 1D photonic crystal $(AB)^5 D^m (BA)^5$

图 3 给出了缺陷层的吸收程度不同时光子晶体

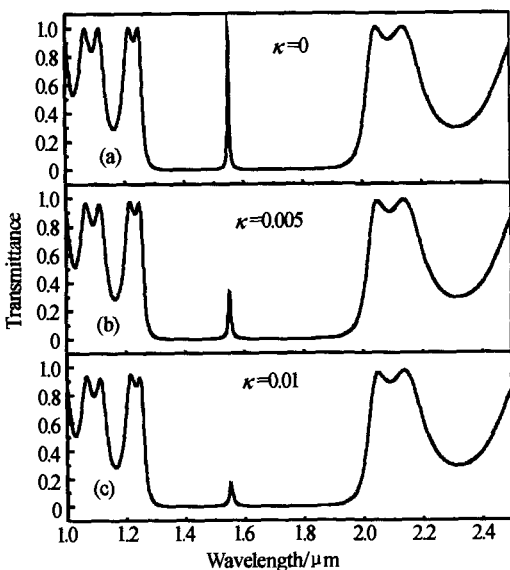


图 3 消光系数 κ 对光子晶体 $(AB)^5 D^2 (BA)^5$ 透射谱的影响
Fig. 3 Effects of extinction coefficient on the spectrum of 1D photonic crystal $(AB)^5 D^2 (BA)^5$

$(AB)^5 D^2 (BA)^5$ 的透射谱. 可以清楚地看到, 随着消光系数 κ 的增大, 禁带中心的缺陷模高度迅速下降, 但透射谱其他部分的特性没有明显的改变. 由此可见缺陷层有限吸收对缺陷模的影响很大, 这在光子晶体的制作和应用中应特别注意.

从图 2 可以看出, 缺陷模的出现与缺陷层的厚度有关, 图 4 绘出了无吸收的一维光子晶体 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 中透射谱随缺陷层厚度 d 变化的三维图像. 可以发现当缺陷层厚度增加时, 在带隙中出现的缺陷模频率向低频(长波)方向移动. 除 $d = \frac{\lambda_0}{4n} \times 1$ 外, 缺陷层为其他厚度时在带隙中都有缺陷模的存在.

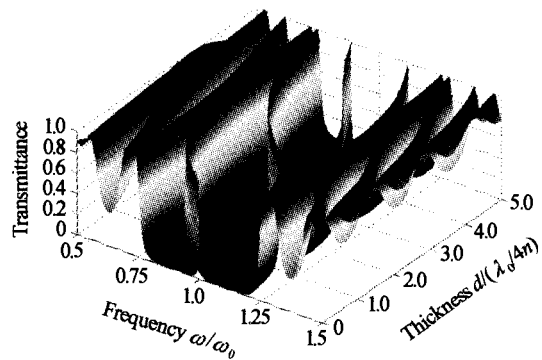


图 4 无吸收缺陷层的厚度对晶体 $(AB)^4 D^m (BA)^4$ 透射谱的影响
Fig. 4 Effects of nonabsorptive defect layer width on the transmission spectrum of crystal $(AB)^4 D^m (BA)^4$

图 5 表示介质周期数 N 及缺陷层厚度对光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的缺陷模特性的影响, 缺陷层

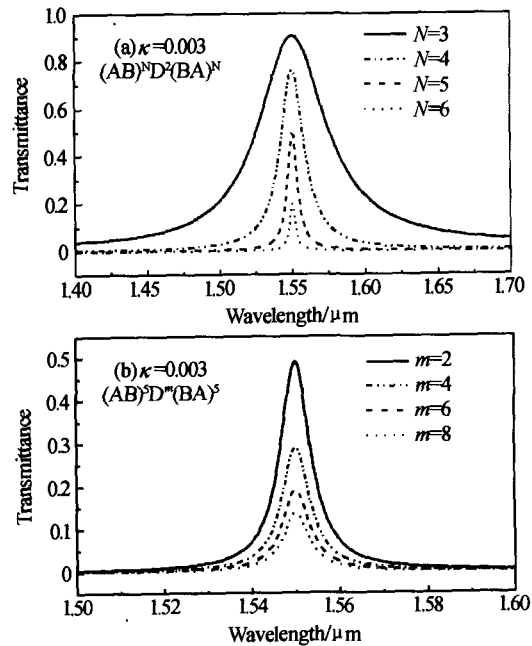


图 5 中心波长 λ_0 附近光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的透射谱
Fig. 5 Spectra of crystal $(AB)^N D^m (BA)^N$ in the vicinity of central wavelength λ_0

的消光系数 $\kappa=0.003$. 在图5(a)中缺陷层的厚度 $d=\frac{\lambda_0}{4n} \times m, m=2$, 但介质的周期数 N 取不同数值; 而图5(b)中周期数 $N=5$, 缺陷层厚度取不同值. 从中可以发现, 随着周期数 N 及缺陷层厚度的增加, 缺陷层有吸收的光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 禁带中的缺陷模不仅高度下降, 而且透射谱线变窄.

2 缺陷模特性的理论研究

2.1 理论公式

从前文可以看出, 光波正入射到一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N (m=2, 4, 6 \dots)$ 上时, 禁带中出现的缺陷模很尖锐. 在中心波长 λ_0 处透射率 T 取极大值, 而当入射光波稍微偏离中心波长时, T 就迅速下降.

因此定义一个偏离小量 $y = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$, 则 A、B 介质的相位厚度均为 $\delta = \frac{\pi}{2} - y$. 再定义一个表示缺陷层有限吸收的小量 $\beta = \frac{\pi\kappa}{2n}$, 忽略小量的高次项, 则一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N (m=2, 4, 6 \dots)$ 的缺陷层相位厚度为 $\delta_D = m(\frac{\pi}{2} - y - i\beta)$.

采用前文的传输矩阵计算方法, 在计算中利用泰勒(Taylor)展开式对各量进行展开, 仅考虑小量的一级近似, 忽略高次项. 则一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的总传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $a=d=(-1)^{m/2}$

$$b = -(-1)^{\frac{m}{2}} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{im}{n-ik} (y+i\beta) +$$

$$2i(-1)^{\frac{m}{2}} \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^N \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) U_{N-1} y$$

$$c = -(-1)^{\frac{m}{2}} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2N} \cdot im(n-ik) (y+i\beta) +$$

$$2i(-1)^{\frac{m}{2}} \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^N (n_1+n_2) U_{N-1} y$$

式中 $U_N(x)$ 为第二类切比雪夫(Chebyshev)多项式, 宗量 $x = -\frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1}\right)$.

由此可得缺陷模的透射率公式(光子晶体外侧为同种介质 $n_0 = n_g$)

$$T = \frac{4n_0^2}{F} \quad (5)$$

式中表达式 F 为

$$F = [2n_0 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{n_0^2 m}{n^2 + \kappa^2} (n\beta + y\kappa) + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2N} m (n\beta -$$

$$y\kappa)]^2 + \left[\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{n_0^2 m}{n^2 + \kappa^2} (yn - \kappa\beta) + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2N} m (yn + \kappa\beta) - 2n_0^2 \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^N \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) U_{N-1} y - 2 \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^N (n_1 + n_2) U_{N-1} y\right]^2$$

当一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N (m=2, 4, 6 \dots)$ 的外侧介质为空气 $n_0=1$, 及周期单元结构 A、B 的折射率 $n_2 > n_1$, 周期数 N 满足 $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^N \gg 1$, 且缺陷层 $\kappa \ll n$ 时, 缺陷模的透射率 T 可近似表示为

$$T = 4 / \{ [2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{m\beta}{n}]^2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \left[\frac{m}{n} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^N + 2(-1)^{N-1} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) U_{N-1} y\right]^2 y^2 \} \quad (6)$$

若 $y=0$, 可得中心波长 λ_0 时的透射率即缺陷模高度的表达式

$$T_0 = \frac{1}{[1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{\pi m \kappa}{4n^2}]^2} \quad (7)$$

由 $T = T_0/2$ 可得缺陷模的半峰全宽值 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0}{\pi} \frac{1 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} \frac{\pi m \kappa}{4n^2}}{\frac{m}{2n} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{2N} + (-1)^{N-1} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^N U_{N-1}} \quad (8)$$

2.2 缺陷模特性研究

众所周知, 若一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N (m=2, 4, 6 \dots)$ 中缺陷层无吸收即消光系数 $\kappa=0$ 时, 缺陷模的高度亦即中心波长 λ_0 的透射率 $T_0 \equiv 1$, 从式(5)至(7)很容易看出.

为了研究缺陷层的不同吸收对缺陷模特性的影响, 以一维光子晶体 $(AB)^5 D^2 (BA)^5$ 为例进行分析, 见图6. 图中 T_0 表示缺陷模的高度, 数值计算与式(7)给出的结论完全吻合. $\Delta\lambda$ 为缺陷模的半峰全宽, 实线为式(8)给出的理论曲线, 黑点为数值计算透射谱时从谱中(见图2、图3)读取的半峰全宽数据, 同样可以发现它们吻合程度很高.

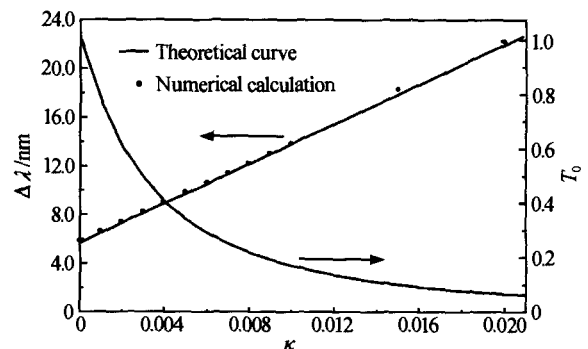


图6 消光系数 κ 对晶体 $(AB)^5 D^2 (BA)^5$ 缺陷模特性的影响
Fig. 6 Effects of extinction coefficient on the defect mode of crystal $(AB)^5 D^2 (BA)^5$

以 $m=2$ 为例,图 7 给出了介质周期数 N 不同时一维光子晶体 $(AB)^N D^2 (BA)^N$ 的缺陷模的特性曲线,缺陷层的消光系数 $\kappa=0.003$. 可以清楚地看到,随着周期数 N 的增大,当 $N=7$ 时缺陷模的高度 T_0 就已降到 0.05 以下,并且理论式(7)与实际数值计算结果完全一致. 缺陷模的半峰全宽同样随着周期数 N 的增大而快速减小. 不过当介质周期数取较小值 $N=3$ 时,式(8)给出的理论数值(以黑三角标记)小于数值计算透射谱时从谱中(见图 5)读得的半峰全宽数据(空心圈标记),这是由于在式(6)的推导中忽略了式(5)中的某些项. 如果考虑式(5)中的那些被忽略项,则两者完全吻合.

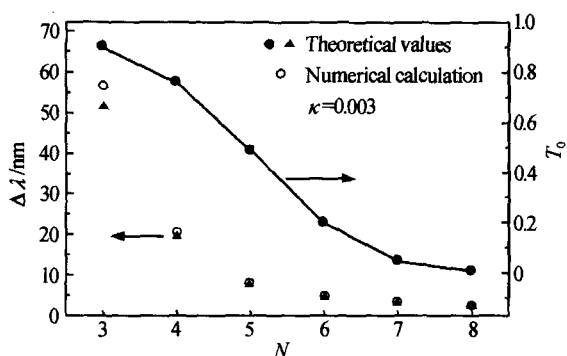


图 7 介质周期数 N 对晶体 $(AB)^N D^2 (BA)^N$ 缺陷模特性的影响

Fig. 7 Effects of the number of periods on the defect mode of crystal $(AB)^N D^2 (BA)^N$

图 8 给出了缺陷层厚度不同时光子晶体 $(AB)^5 D^m (BA)^5$ ($m=2, 4, 6, \dots$) 的缺陷模的特性曲线,缺陷层的消光系数 $\kappa=0.003$. 可以发现,随着缺陷层厚度的增加,缺陷层有吸收一维光子晶体的缺陷模高度 T_0 的下降速度较快,而缺陷模的半峰全宽则稍微变小.

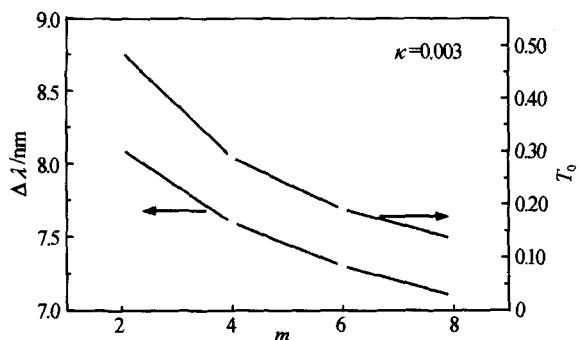


图 8 缺陷层厚度对晶体 $(AB)^5 D^m (BA)^5$ 缺陷模的影响

Fig. 8 Effects of defect layer thickness on the defect mode of crystal $(AB)^5 D^m (BA)^5$

结合图 6、图 7 和图 8,可以发现,影响缺陷模高度 T_0 的因素有消光系数 κ 、介质周期数 N 和缺陷层厚度 m , T_0 随这些量的增大都快速下降;但对缺陷模的半峰全宽,这些因素的影响不同:半峰全宽随 κ 的增大稍微变大,随偶数 m 的增大稍微变小,但随

N 的增大则快速变小. 从式(7)和(8)中可以清楚地看出它们之间的联系.

3 结论

研究了具有缺陷层的一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ 的带隙结构. 发现随着缺陷层厚度的增加,在禁带中出现的缺陷模向低频(长波)方向移动. 利用传输矩阵法给出了缺陷层有吸收的一维光子晶体 $(AB)^N D^m (BA)^N$ ($m=2, 4, 6, \dots$) 缺陷模的透射率公式,并由此得到缺陷模的高度和半峰全宽的计算公式,这些表达式与实际数值计算结果相一致,从而也证明了上述公式的正确性. 研究发现,消光系数 κ 、介质周期数 N 和缺陷层厚度对缺陷模高度的影响较大,它们的增大均使缺陷模高度快速下降;而对半峰全宽的影响则主要取决于介质的周期数 N , N 增大使缺陷模快速变窄.

参考文献

- 1 Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20):2059~2062
- 2 John S. Strong localization of photonics in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23):2486~2489
- 3 Briks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997, **22**(13):961~963
- 4 Yariv A. Coupled-resonator optical waveguide, a proposal and analysis. *Opt Lett*, 1999, **24**(11):711~713
- 5 Fink Y, Winn J N, Fan S, et al. A dielectric omnidirectional reflector. *Science*, 1998, **282**(5394):1679~1682
- 6 朱志宏,叶卫民,季家熔,等. 光子晶体滤波特性分析. 光子学报, 2004, **33**(6):700~703
Zhu Z H, Ye W M, Ji J R, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):700~703
- 7 Noda S, Yokoyama M, Imada M, et al. Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design. *Science*, 2001, **293**(5532):1123~1125
- 8 王维江,周建英,肖万能. 光在一维周期结构中的分布与局域化. 光子学报, 2005, **34**(7):1086~1089
Wang W J, Zhou J Y, Xiao W N. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7):1086~1089
- 9 段晓峰,牛燕雄,张雏,等. 一维光子晶体的光学传输特性分析. 光子学报, 2003, **32**(9):1086~1089
Duan X F, Niu Y X, Zhang C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1086~1089
- 10 Yakoyama H, Nishi K, Anan T, et al. Controlling spontaneous emission and threshold-less laser oscillation

- with optical microcavities. *Optical and Quantum Electronics*, 1992, **24**(2): 245~275
- 11 Villeneuve P R, Fan S, Joannopoulos J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tenability, and coupling efficiency. *Phys Rev B*, 1996, **54**(11): 7837~7842
 - 12 Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**(17): 3294~3297
 - 13 Lidorilis E, Busch K, Li Q M, et al. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structure. *Phys Rev B*, 1997, **56**(23): 15090~15099
 - 14 Agranovich V M, Kiselev S A, Mills D L. Optical multistability in nonlinear superlattices with very thin-layers. *Phys Rev B*, 1991, **44**(19): 10917~10920
 - 15 John S, Akozbek N. Nonlinear optical solitary waves in a photonic band gap. *Phys Rev Lett*, 1993, **71**(8): 1168~1171
 - 16 Stanley R P, Houdre R, Oesterle U, et al. Impurity modes in one-dimensional periodic systems: The transition from photonic band gaps to microcavities. *Phys Rev A*, 1993, **48**(3): 2246~2250
 - 17 Tsai Y C, Shung K W K, Gou S C. Impurity modes in one-dimensional photonic crystals analytic approach. *J Mod Opt*, 1998, **45**(10): 2147~2157
 - 18 许桂雯, 欧阳征标, 安鹤南, 等. 光子晶体缺陷模的带宽与品质因子研究. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1079~1082
Xu G W, Ouyang Z B, An H N, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1079~1082
 - 19 蒋美萍, 江兴方, 沈小明, 等. 一维光子晶体的偏振特性研究. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 612~616
Jiang M P, Jiang X F, Shen X M, et al. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 612~616

Studies on the Defect Mode Properties of 1D Photonic Crystal

Chen Xianfeng¹, Shen Xiaoming¹, Jiang Meiping¹, Ni Zhongwen¹, Shi Dufang^{1,2}

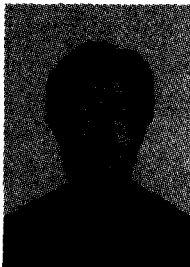
¹ Department of Information Science, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016

² Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2005-04-05

Abstract The photonic band gap structure of 1D photonic crystal with an absorptive defect layer was studied by using the transfer matrix method, and presented formulas for the defect mode height and its full width at half maximum (FWHM) under the first-order Taylor's approximation in the vicinity of central wavelength. Investigations shown that the extinction coefficient, the number of periods and the width of the defect layer had significant effects on the properties of the defect mode. When these parameters increased, the defect mode height decreased quickly. However, the FWHM of the defect mode relied mainly on the number of periods, it decreased quickly with increasing the number of periods, but it changed slightly with the extinction coefficient and the defect layer width.

Keywords Photonic crystal; Defect mode; Transfer matrix; Extinction coefficient



Chen Xianfeng was born in May, 1970. He received the master's degree in physics from Jilin University in 1995. Now he works in the department of information science, Jiangsu Polytechnic University. His research interests include photonic crystal and nonlinear optics.