

文章编号: 1001-3806(2013)06-0742-05

## 材料色散对 1 维光子晶体缺陷模影响的研究

熊翠秀, 蒋练军

(湖南城市学院 通信与电子工程学院, 益阳 413000)

**摘要:** 为了分析材料色散对缺陷模的影响, 对色散材料采用洛伦兹振子模型, 利用传输矩阵法计算了含缺陷 1 维光子晶体的透射谱, 分析了各层的色散对该结构 1 维光子晶体缺陷模的影响。结果表明, 无论是高、低折射率介质还是缺陷层的色散都可以引起缺陷模的频移或分裂; 缺陷模的频移方向与考虑色散后光学厚度的变化有关, 如果光学厚度增大, 则发生红移, 反之则发生蓝移; 低折射率介质的色散使缺陷模频移的效果最显著。这一结果对光子晶体的设计和研究有一定的参考价值。

**关键词:** 光电子学; 缺陷模频移; 传输矩阵法; 材料色散

**中图分类号:** O474 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.008

### Influence of material dispersion on defect modes of 1-D photonic crystal

XIONG Cui-xiu, JIANG Lian-jun

(College of Communication and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract:** In order to study influence of material dispersion on defect modes of 1-D photonic crystal, the transmission spectrum of the 1-D photonic crystal with dispersive material was calculated based on optical transmission matrix, and the dispersive material was described by the Lorentz oscillator model. The effect of material dispersion on defect modes of photonic crystals was analyzed. The results show that whether the dispersion of high and low refractive index medium or the dispersion of defect will bring frequency shift or splitting of defect modes; the defect mode will bring red-shift if the optical thickness of dispersive medium is thicker than the thickness of common medium, and the defect mode will bring blue-shift when the optical thickness of dispersive medium is thinner than the thickness of common medium; the most obvious effect of frequency shift of defect modes results from the dispersion of low refractive index medium. The results have certain reference value to the design and research of photonic crystal.

**Key words:** optoelectronics; frequency shift of defect modes; transfer matrix method; material dispersion

### 引 言

光子晶体是由折射率或介电常数周期性变化的材料, 其概念最早于 1987 年分别由 YABLONOVITCH 和 JOHN 提出<sup>[1-2]</sup>。由于材料的周期性从而出现光子带隙。当周期性结构中引入缺陷时, 会在光子带隙内产生缺陷模, 缺陷模的位置、数目和偏振特性与缺陷的厚度、个数、周期数、折射率及入射角等有关<sup>[3-8]</sup>。普通意义上讲, 材料的折射率与材料和

波长或频率有关, 即有色散, 考虑材料的色散后问题将更加复杂化。有学者对色散介质采用洛伦兹模型, 运用传输矩阵法研究了色散对 1 维光子晶体光子带隙的影响, 其色散强度、谐振频率及高低折射率介质的折射率之差对光子带隙有影响<sup>[9-10]</sup>。色散对光子晶体的透射谱也有影响, 以往的研究主要集中在缺陷的色散对缺陷模的影响上。WANG 等人<sup>[11]</sup>对色散介质采用洛伦兹模型, 并用时域有限差分法计算了含色散缺陷 1 维光子晶体微腔的透射谱, 详细研究了缺陷模的频移特性, 其研究结果显示, 缺陷的色散使低频端和高频端的缺陷模分别向更低频端和更高频端发生频移, 而使谐振频率附近的缺陷模中心频率两边出现了两个或更多的模式。CHEN 等人<sup>[12]</sup>和 HU 等人<sup>[13]</sup>也用洛伦兹振子模型, 用传输矩阵法和简正耦合模理论研究了缺陷的色散对缺陷

基金项目: 湖南省益阳市科技计划资助项目 (2012JZ09)

作者简介: 熊翠秀 (1980-), 女, 硕士, 现主要从事光学方面的研究工作。

E-mail: xiongcuixiu@163.com

收稿日期: 2013-02-26; 收到修改稿日期: 2013-04-17

模的影响,其研究结果显示,缺陷的色散使谐振频率处的缺陷模分裂为简正耦合模,一个模式频率低于谐振频率,另一个模式频率高于谐振频率。个别研究表明,非缺陷层的色散对缺陷模有一定的影响,考虑色散后缺陷态的位置较不考虑色散时明显发生红移<sup>[14]</sup>。

事实上,作为整体的一部分,无论是缺陷介质还是高、低折射率介质的色散都有可能对透射谱有影响,即对缺陷模有一定的影响,并且高、低折射率介质的色散对缺陷模的影响可能不只使缺陷模发生红移,也有可能发生蓝移。作者参照参考文献[11]中的洛伦兹模型和参量选取,用传输矩阵法<sup>[15]</sup>计算了不同色散强度下的透射谱,分析了各介质层的色散对缺陷模的影响,得到了相应的研究结果。

### 1 理论模型

1 维光子晶体  $(AB)_N C (BA)_N$  的结构如图 1 所示,其中  $N$  是周期数。不考虑色散时,介质 A、B 和 C 的相对介电常数分别为  $\epsilon_A, \epsilon_B$  和  $\epsilon_C$ , 相对磁导率分别为  $\mu_A, \mu_B$  和  $\mu_C$ , 相应的折射率分别是  $n_A = \sqrt{\epsilon_A \mu_A}, n_B = \sqrt{\epsilon_B \mu_B}$  和  $n_C = \sqrt{\epsilon_C \mu_C}$ , 几何厚度分别为  $d_A, d_B$  和  $d_C$ 。考虑色散时,对色散介质采用洛伦兹振子模型,相应的相对介电常数为<sup>[11]</sup>:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_d + \frac{\chi_0 \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_d, \omega, \omega_0, \chi_0$  和  $\gamma$  分别是背景材料的相对介电常数、光场频率、谐振频率(相应的谐振波长用  $\lambda_0$  表示,以下所有  $\lambda_0$  均表示谐振波长)、色散强度和衰减系数。

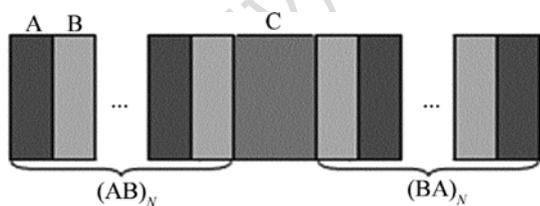


Fig. 1 Structure of 1-D photonic crystal  $(AB)_N C (BA)_N$

### 2 数值计算结果

用传输矩阵法<sup>[15]</sup>计算该 1 维光子晶体在不同色散强度下的透射谱。参量的选取参见参考文献[9]和参考文献[11],不考虑色散时,取  $\epsilon_A = 4.0, \epsilon_B = 1.8$  和  $\epsilon_C = 3.0, N = 10$ ,假设所有介质都是非铁磁介质。考虑色散时,色散介质的介电常数按

(1)式计算,其中背景材料的介电常数取不考虑色散时材料的介电常数,谐振频率和衰减系数分别取  $\omega_0 = 6.2 \times 10^{14} \text{ Hz}, \gamma = 6.2 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 。令光波垂直入射,则 TE 波和 TM 波的透射谱完全一致。由于本文中只研究色散对缺陷模的影响,故计算折射率时做与参考文献[9]中相同的处理,即只取实部。在 MATLAB 7.0 环境下编程计算,计算过程中光场频率  $\omega$  对谐振频率  $\omega_0$  进行归一化,表示为  $g = \omega/\omega_0$ , 归一化频率  $g$  的步长取为 0.00001。

#### 2.1 高折射率层的色散对缺陷模的影响

考虑介质 A 为色散材料,介质 B 和 C 是普通介质。取两组参量。第 1 组:不考虑色散时, A、B 和 C 各介质层的光学厚度分别取  $\lambda_0/4, \lambda_0/4$  和  $\lambda_0$ ;考虑色散时,各层的几何厚度与不考虑色散时的几何厚度保持一致,不同色散强度下的透射谱对应于图 2a。第 2 组:不考虑色散时, A、B 和 C 各介质层的

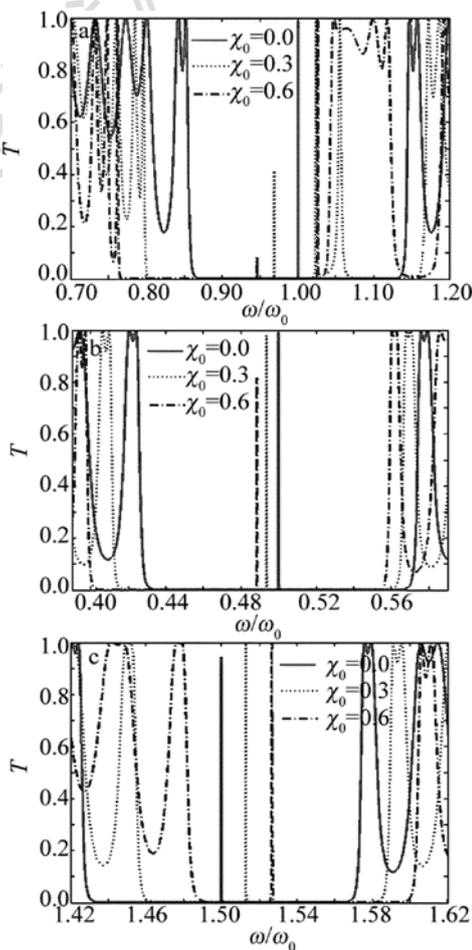


Fig. 2 Transmission spectrum of the 1-D photonic crystal when high refractive index medium A is dispersive  
a—near the resonant frequency b—at low frequency c—at high frequency

光学厚度分别取  $\lambda_0/2$ ,  $\lambda_0/2$  和  $\lambda_0$ ; 考虑色散时, 各层的几何厚度与不考虑色散时的几何厚度保持一致, 图 2b 和图 2c 分别对应于第 2 组参量下,  $\omega < \omega_0$  和  $\omega > \omega_0$  的两个禁带。由图 2 可知, 高折射率介质 A 的色散不仅对带隙有影响, 对缺陷模也有影响。考虑色散后, 处于洛伦兹振子谐振频率附近的缺陷模会分裂, 而高、低频端的缺陷模发生频移, 且缺陷模的频移方向与带隙中心的移动方向一致。由图 2b 可知, 当禁带处于  $\omega < \omega_0$  时, 随着  $\chi_0$  的增大, 带隙中心和缺陷模都不断向更低频方向移动, 并且带隙的下带边向低频方向移动的速度快于缺陷模的移动速度, 而上带边的移动速度与缺陷模的移动速度差不多, 故随着  $\chi_0$  的增大, 该带隙及带隙内的缺陷模都不会消失; 由图 2c 可知, 当禁带处于  $\omega > \omega_0$  时, 随着  $\chi_0$  的增大, 带隙中心和缺陷模都不断向更高频方向移动, 下带边的移动速度明显快于缺陷模的频移速度, 而上带边向高频方向的移动速度略大于缺陷模的频移速度, 故  $\chi_0$  增大到一定值之后, 缺陷模落到了下带边左侧的导带里, 带隙内的缺陷模消失, 继续增大  $\chi_0$  到比较大时, 该带隙就会消失。考虑色散时, 带隙的变化规律与参考文献 [9] 和参考文献 [10] 中的报道一致。

### 2.2 低折射率层色散对缺陷模的影响

考虑介质 B 为色散材料, 介质 A 和 C 是普通介质, 不同色散强度下的透射谱如图 3 所示。参量选取如下: 图 3a 中的参量与图 2a 中的参量保持一致, 图 3b 和图 3c 中的参量与图 2b 和图 2c 中的参量保持一致。由图 3 可知, 考虑低折射率介质 B 色散时, 缺陷模的频移规律与考虑高折射率介质 A 色散时的情况基本一致, 只是频移的量有所不同。由图 3b 可知, 当禁带处于  $\omega < \omega_0$  时, 随着  $\chi_0$  的增大, 带隙中心和缺陷模都不断向更低频方向移动, 且缺陷模频移的速度快于下带边向低频方向移动的速度, 而明显慢于上带边的移动速度, 故当  $\chi_0$  增大到一定值以后, 缺陷模及带隙都会消失; 由图 3c 可知, 当禁带处于  $\omega > \omega_0$  时, 随着  $\chi_0$  的增大, 带隙中心和缺陷模都不断向更高频方向移动, 用相同的分析方法可知, 该带隙不会消失, 且  $\chi_0$  增大到很大值以后, 该带隙内的缺陷模才会消失。

本文中的研究表明, 考虑色散后, 低频端的缺陷模发生红移, 而高频端的缺陷模发生蓝移。且当  $\chi_0$  增大到一定值以后缺陷模及带隙都有可能消失。这与已有的报道 [14] 有一定差异。

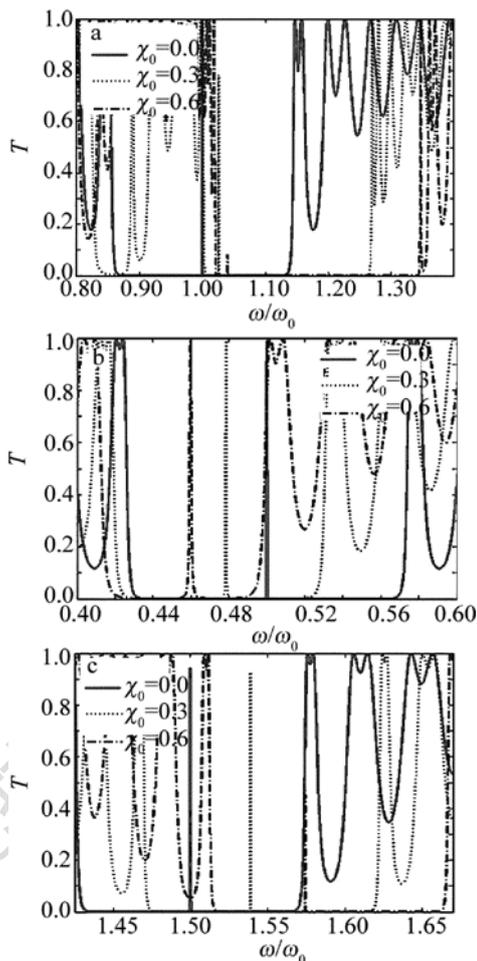


Fig. 3 Transmission spectrum of the 1-D photonic crystal when low refractive index medium B is dispersive  
a—near the resonant frequency b—at low frequency c—at high frequency

### 2.3 缺陷层色散对缺陷模的影响

已有学者详细研究了缺陷层的色散对缺陷模的影响 [11-13]。为了综合比较, 本文中用传输矩阵法, 再次计算了考虑缺陷层 C 色散时, 该 1 维光子晶体的透射谱, 如图 4 所示。参量选取如下: 图 4a 中的参量与图 2a 中的参量一致, 图 4b 和图 4c 中的参量与图 2b 和图 2c 中的参量一致。从图 4 可知, 缺陷层 C 的色散对带隙的影响不明显, 而对缺陷模的影响很明显, 表现为: 使洛伦兹振子谐振频率附近的缺陷模发生模式分裂, 使低频端的缺陷模向更低频方向频移, 而使高频端的缺陷模向更高频方向频移。这些现象与已有的研究结果 [11-13] 一致。由图 4b 和图 4c 可知, 随着  $\chi_0$  的增大, 缺陷模向低频端的频移速度慢于向高频端的频移速度, 故低频端禁带内的缺陷模消失得比较慢, 而高频端禁带内的缺陷模消失得比较快。

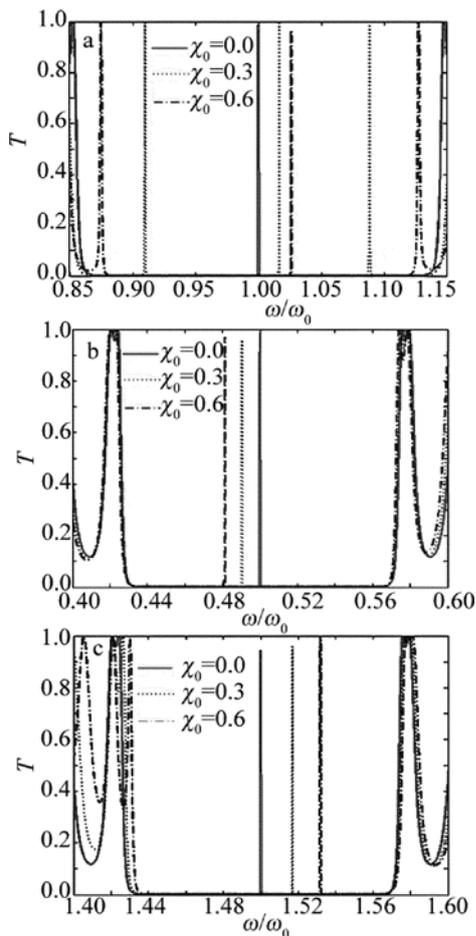


Fig. 4 Transmission spectrum of the 1-D photonic crystal when defect C is dispersive  
a— near the resonant frequency b—at low frequency c—at high frequency

### 2.4 各介质层色散对缺陷模影响的比较

综合以上分析结果可知,高、低折射率介质 C 的色散对带隙及缺陷模都有明显的影响,而缺陷层的色散基本上只影响缺陷模。无论哪种介质的色散对缺陷模的影响都表现出色散使低频端和高端的缺陷模发生频移。为了比较各种介质的色散对缺陷模频移的影响程度,通过传输矩阵法,分别计算了考虑其中一种介质色散时,不同  $\chi_0$  对应的缺陷模的中心频率,得到缺陷模的频率中心与  $\chi_0$  的关系如图 5 所示。根据前面的分析可知,考虑高折射率介质 A 色散时,随着  $\chi_0$  的增大,处于  $\omega > \omega_0$  的缺陷模和禁带会消失,而考虑低折射率介质 B 色散时,随着  $\chi_0$  的增大,处于  $\omega < \omega_0$  的缺陷模和禁带会消失,当考虑缺陷 C 色散时,随着  $\chi_0$  的增大,处于  $\omega < \omega_0$  和  $\omega > \omega_0$  的缺陷模都会消失,且  $\omega > \omega_0$  的禁带内的缺陷模消失得更快,故图 5 中,不同曲线的数据点数不同。由图 5 可知,不同介质的色散对缺陷模的频

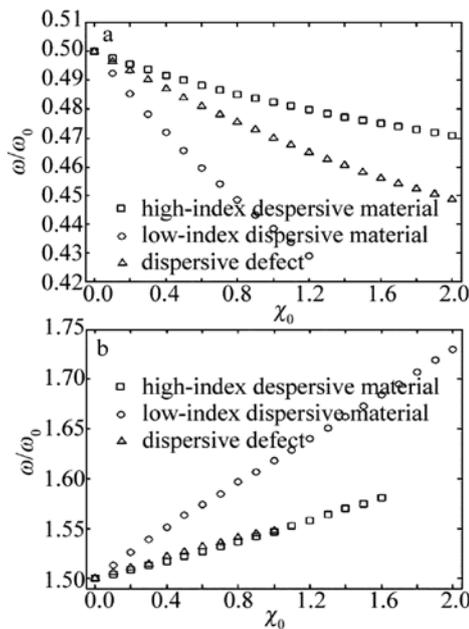


Fig. 5 Center frequency of defect modes versus dispersion strength  $\chi_0$   
a—at low frequency b—at high frequency

移有不同程度的影响。在文中所取参量下,低折射率介质 B 的色散对缺陷模的频移影响最明显,而高折射率介质 A 的色散对缺陷模的频移影响相对来说不是太明显。

为了进一步分析问题,给出由(1)式计算的高、低折射率介质 A, B 在不同  $\chi_0$  下,不同频率处对应的折射率实部,如图 6 所示。事实上,缺陷 C 的折射率实部与频率之间的关系与图 6 类似,在此不再

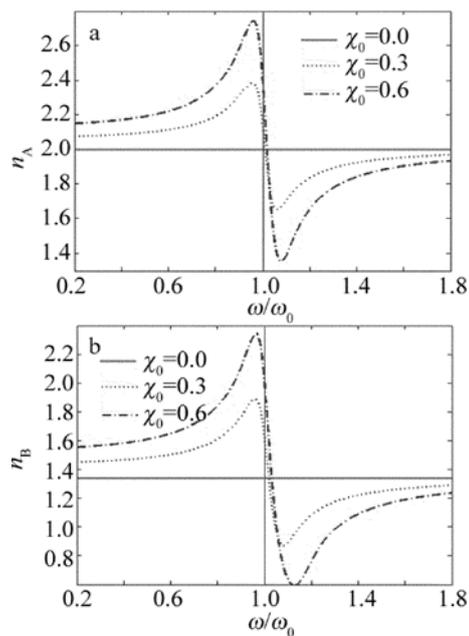


Fig. 6 Real part of refractive index of dispersive medium  
a— real part of refractive index of dispersive medium A b— real part of refractive index of dispersive medium B

重复。由图 6 可知,介质在洛伦兹振子谐振频率  $\omega_0$  附近处于反常色散,而其它频段处于正常色散。低频端的正常色散区,考虑色散后的折射率比不考虑色散时的折射率大,并且相同频率下,  $\chi_0$  越大,折射率也越大;在高频端,则相反。由于考虑色散后的几何厚度与不考虑色散时的几何厚度保持一致,这就意味着低频端光学厚度将增大,并且  $\chi_0$  越大,光学厚度增大得越多;在高频端光学厚度减少,  $\chi_0$  越大,光学厚度减小得越多。结合图 2 ~ 图 6 可知,在正常色散频段,如果光学厚度增大,缺陷模向更低频方向移动;如果光学厚度减小,缺陷模向更高频端移动,且色散强度越大,频移越多。即考虑色散后,光学厚度的变化决定缺陷模的频移方向。而谐振频率  $\omega_0$  附近的反常色散区,考虑色散后,折射率有增大,也有减小,故  $\omega_0$  附近的反常色散区模式会分裂。但高、低折射率介质 A, B 的色散对  $\omega_0$  附近的带隙影响很大,特别是低折射率介质 B 色散时,随着  $\chi_0$  增大,禁带明显向高频端移,缺陷模分裂后,小于  $\omega_0$  的模式落到了导带里,所以图 3a 中,考虑介质 B 色散后,  $\omega_0$  附近只有一个透射峰,而缺陷 C 的色散对带隙影响不明显,故图 4a 中,考虑色散后谐振频率附近有多个透射峰并存。

值得注意的是,考虑高低折射率介质色散时,当  $\chi_0$  比较大的情况下,会出现新的禁带,新禁带内的缺陷模与  $\chi_0$  的变化规律与原禁带内的缺陷模的变化规律一致;此外,随着  $\chi_0$  的增大,原来落在导带里的缺陷模可能会移到禁带,导致  $\chi_0$  比较大时,有的禁带内出现了两个透射峰。

### 3 结 论

采用传输矩阵法,计算了含缺陷两端对称 1 维光子晶体的透射谱,分析了各个介质层色散时,不同频段缺陷模随  $\chi_0$  的变化规律。分析表明,任意一层材料的色散都会使缺陷模发生频移或分裂。具体表现为:(1)高低折射率介质的色散使缺陷模发生红移或蓝移,缺陷模的频移方向与考虑色散后光学厚度的变化有关,如果光学厚度增大,则缺陷模向更低频端移动,反之则向更高频端移动,考虑某一种介质色散时,  $\chi_0$  越大,则频移量越大;(2)低折射率介质 B 的色散使缺陷模的频移现象最显著;(3)考虑高、低折射率介质的色散后,  $\omega_0$  附近的反常色散区,带

隙的移动较多,故模式分裂后有的模式可能落到了导带里,表现出  $\omega_0$  附近的缺陷模可能向低频端或高频端移动的现象。

### 参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physics Review Letters*, 1987, 58 (20):2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localities of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Physics Review Letters*, 1987, 58 (23): 2486-2489.
- [3] SU A, LI X J. Defect modes of one-dimensional photonic crystal for realizable multiple channeled filter [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(5):532-536 (in Chinese).
- [4] WANG J Zh, XIONG Y Q, WANG D Sh, *et al.* Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (10):2914-2919 (in Chinese).
- [5] LI Zh Q, KANG L L, SU F Y. Defect mode in one-dimensional photonic crystal [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(5):767-769 (in Chinese).
- [6] YU Zh M, Zh J. Changes of narrow defect mode during the small changes of incident angle [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(6):876-883 (in Chinese).
- [7] LIU Q N. Resonance theory of the defect mode of 1-D doping photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41 (4):446-450 (in Chinese).
- [8] WANG J J, ZHU Zh P, LU L Zh, *et al.* Transmission of elliptically polarized waves through 1-D anisotropic photonic crystals [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6):818-821 (in Chinese).
- [9] GAO J X, WU J J. Influence of the material dispersion on the bandgap of one-dimensional photonic crystal [J]. *Journal of Ningxia University*, 2011, 32(3):243-247 (in Chinese).
- [10] WU J J. Effect of material dispersion on bandgap of one-dimensional graded photonic crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, 40(2):474-479 (in Chinese).
- [11] WANG H, OUYANG Zh B, HAN Y L, *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 (in Chinese).
- [12] CHEN Sh W, WANG X M, LI H, *et al.* Physical model on normal coupled modes in a symmetric one-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2005, 26 (6):699-703 (in Chinese).
- [13] HU P, TAN Zh X, LIAO Q H, *et al.* Normal coupled modes in a symmetric one-dimension photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2006, 27(3):291-295 (in Chinese).
- [14] LIU W K, AN Y W, ZHANG Ch N, *et al.* Accurate forbidden band of 1-D photonic crystal [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(7):127-130 (in Chinese).
- [15] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978:197 (in Chinese).