

# 光子晶体缺陷层吸收特性的研究

马 季<sup>1</sup> 吴向尧<sup>1</sup> 刘晓静<sup>1</sup> 张斯淇<sup>1</sup> 李 宏<sup>1</sup> 王 婧<sup>1</sup> 巴 诺<sup>1</sup> 尹新国<sup>2</sup> 郭义庆<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 吉林师范大学物理学院, 吉林 四平 136000  
<sup>2</sup> 淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000  
<sup>3</sup> 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

**摘要** 用传输矩阵法对含缺陷层的一维光子晶体的吸收特性进行了系统的研究。取介质层为非金属介质, 缺陷层为金属介质, 给出实际材料构成的光子晶体吸收率与波长的关系曲线, 又对任意介质构成的光子晶体吸收特性进行了研究, 即分别研究了入射角的变化、缺陷层折射率虚部的变化、介质层折射率的变化、介质层厚度的变化以及光子晶体周期结构的变化对光子晶体吸收特性的影响, 得到了一些有价值的结论。通过调节光子晶体的一些参数, 就可以发现这些参数对光子晶体吸收率的影响, 从而为光子晶体的设计和制备提供了重要的理论依据。

**关键词** 光电子学; 光子晶体; 吸收特性; 缺陷层

**中图分类号** O431.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0306002

## Research on the Absorption Property of Defect Layer in Photon Crystals

Ma Ji<sup>1</sup> Wu Xiangyao<sup>1</sup> Liu Xiaojing<sup>1</sup> Zhang Siqi<sup>1</sup> Li Hong<sup>1</sup> Wang Jing<sup>1</sup>  
Ba Nuo<sup>1</sup> Yin Xinguo<sup>2</sup> Guo Yiqing<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China

<sup>2</sup> Institute of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China

<sup>3</sup> Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The absorption property of one-dimensional photonic crystals with defect layer by the approach of transmission matrix is studied. In the photonic crystals, the medium layers are nonmetal, and the defect layer is metal. The relationship between absorption of real material and wavelength is given out, and then the absorption property of the photonic crystals is studied systematically, which is made up of arbitrary material. The effects of the incident angle, the refractive index of defect layer, the refractive index of medium layer, the thickness of medium layer and the periodic structure on the absorption property in the one-dimensional photonic crystals are given. Some valuable results are obtained. By adjusting the parameters of the photonic crystal, the affect of these parameters on the absorption property of the photonic crystals is found, which provides important theoretical basis for the design and preparation of photonic crystals.

**Key words** optoelectronics; photon crystals; absorption property; defect model

**OCIS codes** 350.4238; 350.7420; 310.6805

## 1 引 言

光子晶体是由不同折射率材料周期排列而成的人工结构, 这种结构的厚度约在百纳米到千纳米之间, 光子晶体的最大特征是它能阻止某一波段的光

通过, 人们称之为光子晶体的禁带<sup>[1-5]</sup>。也就是说, 当入射光的波长处于该波段则其光路被“禁止”, 这就出现了光子禁带。光子晶体的这一奇特性引起了人们的广泛兴趣, 并且有很多国内外的学者专家

**收稿日期**: 2013-09-22; **收到修改稿日期**: 2013-10-17

**基金项目**: 国家自然科学基金(11247201)、吉林省科技发展计划基金(20130101031JC)

**作者简介**: 马 季(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事理论物理方面的研究。E-mail: maji531@163.com

**导师简介**: 吴向尧(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事理论物理方面的研究。E-mail: wuxy2066@163.com(通信联系人)

对其进行了科学研究,有关于光子晶体的研究已成为当今科研界的一个重要研究方向<sup>[6-9]</sup>。在理论和实验方面得到迅速发展,光子晶体的出现使得信息处理的光子化成为可能。在以往的研究中大多数研究者研究的是光子晶体的透射率、反射率以及色散关系<sup>[10-15]</sup>,在文献[16]中,Yu等初步研究了光子晶体的吸收率,只研究了周期数为5时介质层厚度变化对吸收率的影响,没有对光子晶体吸收率的影响因素进行全面的因素。本文系统地研究了影响光子晶体吸收率的5个因素,即分别计算了入射角变化、缺陷层折射率变化、介质层折射率变化、介质层厚度变化以及周期结构的变化对光子晶体吸收特性的影响,得到了更多的有价值的结论,这为光子晶体的设计与制备提供了更多的理论依据。

## 2 原 理

本文研究了加缺陷层的一维光子晶体,其结构为(BA)<sup>16</sup>D(BA)<sup>16</sup>,如图1所示。其中A、B、D分别表示介质层A、介质层B和缺陷层介质D,光子晶体中电场和磁场可用一个二分量的列矩阵 $\begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix}$ 表示,对于介质层A、B其传输矩阵 $M_A$ 、 $M_B$ 分别为<sup>[14]</sup>

$$M_A = \begin{pmatrix} \cos \delta_a & \frac{-i \sin \delta_a}{\eta_a} \\ -i \eta_a \sin \delta_a & \cos \delta_a \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$M_B = \begin{pmatrix} \cos \delta_b & \frac{-i \sin \delta_b}{\eta_b} \\ -i \eta_b \sin \delta_b & \cos \delta_b \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\delta_a = \frac{\omega}{c} n_a a \cos \theta_t^a$ ,  $\eta_a = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_a \cos \theta_t^a$ ,  $\delta_b = \frac{\omega}{c} n_b b \cos \theta_t^b$ ,  $\eta_b = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_b \cos \theta_t^b$ , 其中  $a(b)$  和  $n_a(n_b)$  分别表示介质层 A(B) 的厚度和折射率,介电常数和真空磁导率分别为  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ ,  $\mu_0 = 12.566 \times 10^{-7}$ 。 $\cos \theta_t^a = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_a}\right)^2}$ ,  $\cos \theta_t^b = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta}{n_b}\right)^2}$ ,  $\theta$  为入射角。

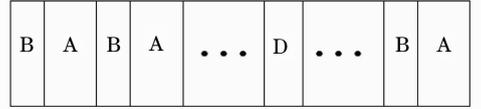


图1 加缺陷一维光子晶体结构

Fig.1 Structure of one-dimensional photonic crystal with defect layer

对于周期数是  $N$  的结构为  $(BA)^N$ ,其入射电磁场和出射电磁场关系为

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = M_1 M_2 \cdots M_N \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = M_B M_A M_B M_A \cdots M_B M_A \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ x_3 & x_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中  $M = M_B M_A M_B M_A \cdots M_B M_A$ , (3) 式就是以  $\theta$  角入射的光在一维光子晶体中的传输矩阵方案。

光在一维光子晶体中传播的透射系数、透射率、反射系数、反射率和吸收率分别为<sup>[14]</sup>

$$t = \frac{E_{tN+1}}{E_{i1}} = \frac{2\eta_0 \cos \theta_i^0}{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_N \cos \theta_i^0 + C + D\eta_{N+1}}, \quad (4)$$

$$T = t \cdot t^*, \quad (5)$$

$$r = \frac{E_{r1}}{E_{i1}} = \frac{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_{N+1} \cos \theta_i^0 - C - D\eta_{N+1}}{A\eta_0 \cos \theta_i^0 + B\eta_0 \eta_{N+1} \cos \theta_i^0 + C + D\eta_{N+1}}, \quad (6)$$

$$R = r \cdot r^*, \quad (7)$$

$$A = 1 - T - R. \quad (8)$$

## 3 数值分析

### 3.1 实际材料构成的光子晶体

以实际材料构成的加缺陷的一维光子晶体为例,介质层B为Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>,折射率为 $n_b = 1.35$ ,光学厚度为 $b = 150$  nm,介质层A为ZnSe,折射率为 $n_a = 2.58$ ,光学厚度为 $a = 317$  nm,缺陷层D为金属Al,折射率为 $n_d = 1.48 + 3.9i$ ,折射率为复数,表示

电磁波在该介质中传播时被介质吸收发热而产生损耗,光学厚度为 $d = 1200$  nm。光子晶体结构为(BA)<sup>16</sup>D(BA)<sup>16</sup>,研究波长 $\lambda$ 范围为600~1500 nm,入射光取TE波,入射角 $\theta = 0$ 即垂直入射。由(8)式得到加缺陷的一维光子晶体波长与吸收率的关系曲线,如图2所示。

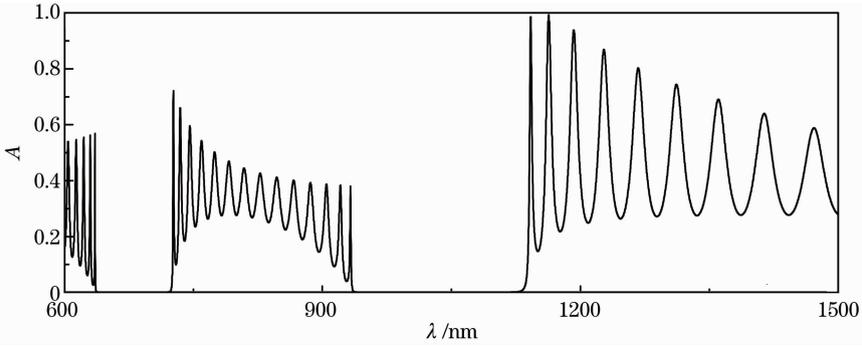


图2 吸收率与波长关系曲线

Fig. 2 Curve between absorption ratio and wavelength

从图2中可以看出加金属缺陷的光子晶体对入射光具有吸收性,且存在吸收率为零的波段,为方便起见,定义吸收率为零的区域为无吸区。

### 3.2 任意介质构成的光子晶体

为了便于观察介质参数变化对加金属缺陷的光子晶体吸收特性的影响,取任意介质构成的光子晶体,其基本参数如下:介质层B的折射率  $n_b=1.66$ ,光学厚度为  $b=176\text{ nm}$ ,介质层A的折射率  $n_a=3.23$ ,光学厚度为  $a=458\text{ nm}$ ,缺陷层D的折射率  $n_d=2.86+0.003i$ ,光学厚度为  $d=3200\text{ nm}$ ,光子晶体结构取为  $(BA)^{16}D(BA)^{16}$ ,研究波长  $\lambda$  范围段

为  $600\sim 1500\text{ nm}$ ,入射光取 TE 波,入射角  $\theta=0$  即垂直入射。

在以下讨论中运用控制变量方法,分别研究入射角、缺陷层折射率、介质层折射率、介质层厚度以及周期结构对吸收特性的影响。

#### 1) 入射角 $\theta$ 对吸收率 A 的影响

图3(a)、(b)表示入射角分别为  $\theta=\pi/12$ 、 $\theta=5\pi/12$  时波长与吸收率的关系曲线。通过对比可以看出:随入射角的增大吸收率增加,无吸区变宽且向短波方向移动。

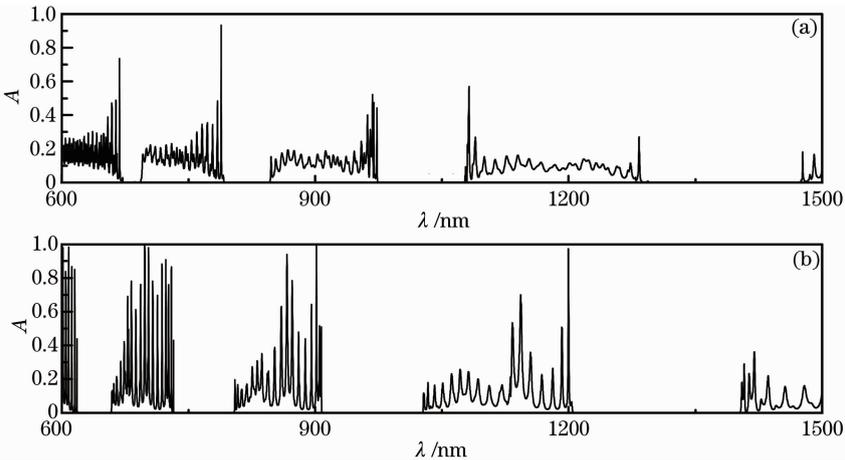


图3 入射角变化对吸收率的影响。(a)  $\theta=\pi/12$ ; (b)  $\theta=5\pi/12$

Fig. 3 Influence of incident angle on absorption. (a)  $\theta=\pi/12$ ; (b)  $\theta=5\pi/12$

#### 2) 缺陷层折射率 $n_d$ 虚部对吸收率 A 的影响

图4(a)、(b)表示缺陷层的折射率分别为  $n_d=2.86+0.001i$ ,  $n_d=2.86+0.005i$  时波长与吸收率的关系曲线。对比可以看出:随缺陷层折射率的虚部的增加,吸收率明显增大,无吸区的宽度和位置基本不变。

#### 3) 介质层 A 折射率 $n_a$ 对吸收率的影响

图5(a)、(b)表示介质层 A 的折射率分别为  $n_a=2.23$ ,  $n_a=4.23$  时波长与吸收率的关系曲线。

对比可以看出:随着介质 A 折射率  $n_a$  的增加,吸收率略有变化,无吸区变窄且向短波方向移动,在  $600\sim 1500\text{ nm}$  范围内无吸区个数增加。

#### 4) 介质层 A 厚度 a 对吸收率的影响

图6(a)、(b)表示介质层 A 的厚度分别为  $a=448\text{ nm}$ ,  $a=648\text{ nm}$  时波长与吸收率的关系曲线。对比可以看出:随着介质层 A 厚度的增加,吸收率略有变化,无吸区变窄且向短波方向移动,在  $600\sim 1500\text{ nm}$  范围内无吸区个数增加。

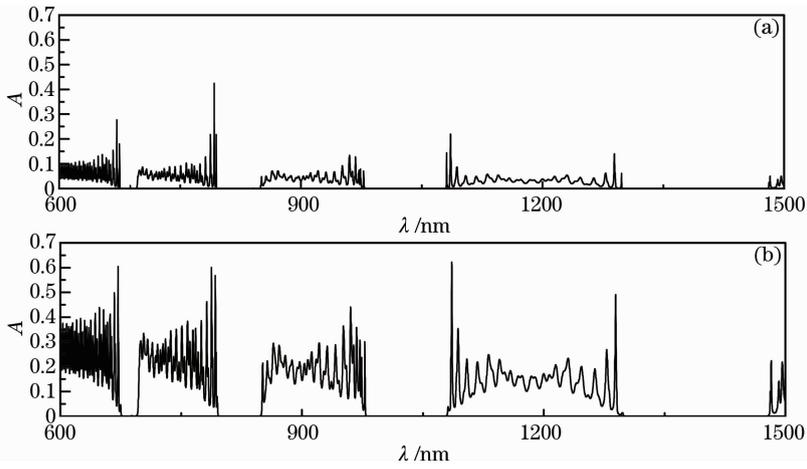


图 4 缺陷层折射率虚部变化对吸收率的影响。(a)  $n_d = 2.86 + 0.001i$ ; (b)  $n_d = 2.86 + 0.005i$

Fig. 4 Influence of the imag of defect layer refractive index on absorption. (a)  $n_d = 2.86 + 0.001i$ ; (b)  $n_d = 2.86 + 0.005i$

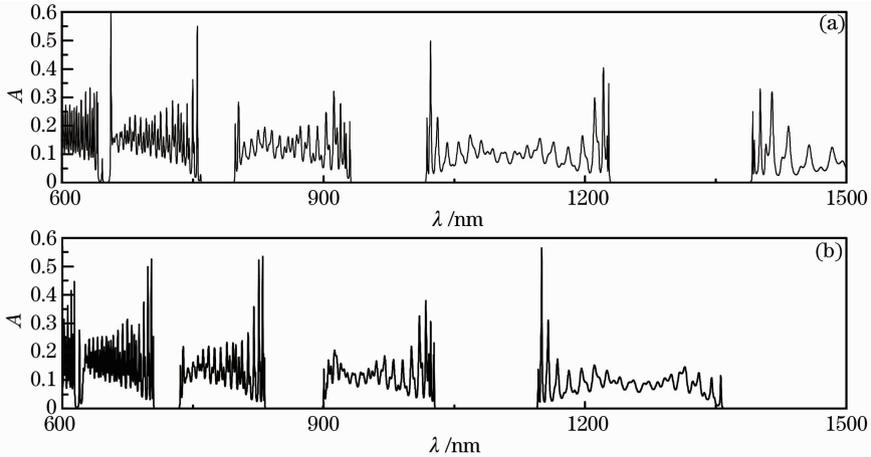


图 5 介质层 A 折射率变化对吸收率的影响。(a)  $n_a = 2.23$ ; (b)  $n_a = 4.23$

Fig. 5 Influence of the refractive index in A layer on absorption. (a)  $n_a = 2.23$ ; (b)  $n_a = 4.23$

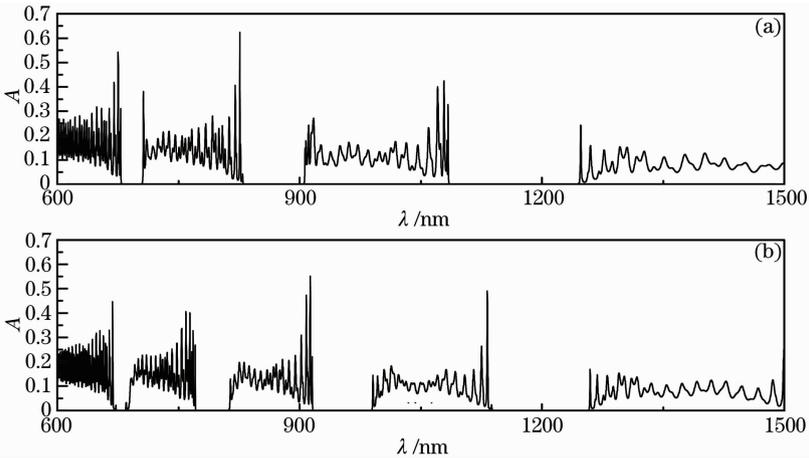


图 6 介质层 A 厚度变化对吸收率的影响。(a)  $a = 448 \text{ nm}$ ; (b)  $a = 648 \text{ nm}$

Fig. 6 Influence of the thickness in A layer on absorption. (a)  $a = 448 \text{ nm}$ ; (b)  $a = 648 \text{ nm}$

5) 周期数  $N$  对吸收率  $A$  的影响

看出:随着周期数的增加,吸收率略有变化,态密度变大,无吸区的宽度和位置基本不变。

图 7(a)~(c) 表示周期数分别为  $N = 16$ 、 $N = 32$ 、 $N = 64$  时波长与吸收率的关系曲线。对比可以

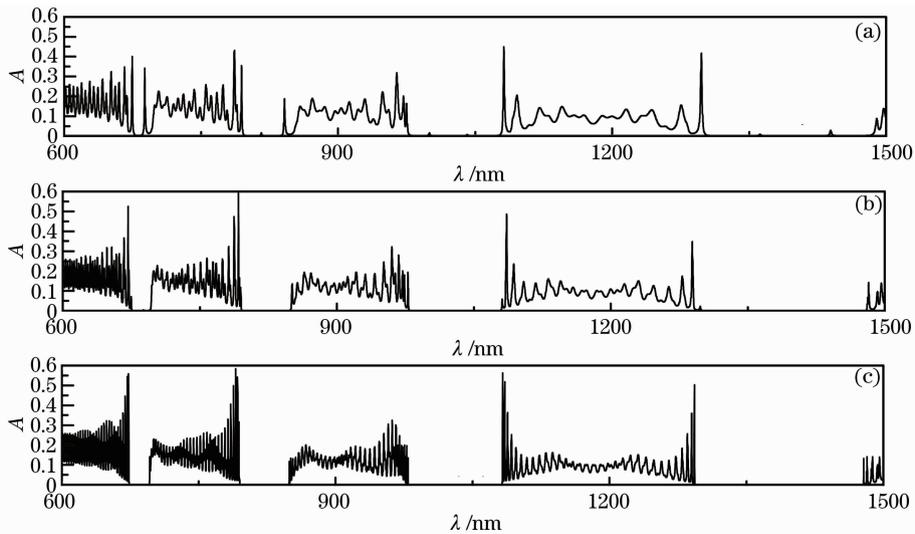


图7 周期数变化对吸收率的影响。(a)  $N=16$ ; (b)  $N=32$ ; (c)  $N=64$

Fig. 7 Influence of the change of the number of period on absorption. (a)  $N=16$ ; (b)  $N=32$ ; (c)  $N=64$

## 4 结 论

通过对影响一维光子晶体的吸收率的因素进行研究,根据以上计算分析得到如下结论:1) 随入射角的增大吸收率增加,无吸区变宽且向短波方向移动;2) 随缺陷层折射率的虚部的增加,吸收率明显增大,无吸区的宽度和位置基本不变;3) 随着介质A折射率 $n_a$ 的增加,吸收率略有变化,无吸区变窄且向短波方向移动,在600~1500 nm范围内无吸区个数增加;4) 随着介质层A厚度的增加,吸收率略有变化,无吸区变窄且向短波方向移动,在600~1500 nm范围内无吸区个数增加;5) 随着周期数的增加,吸收率略有变化,态密度变大,无吸区的宽度和位置基本不变。以上这些结论,将为光子晶体的设计与制备提供理论上的依据。

## 参 考 文 献

- 1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Y Chassagneux, R Colombeli, W Mauneult, *et al.*. Electrically pumped photonic crystal terahertz lasers controlled by boundary condition[J]. Nature, 2009, 457(7226): 174-178.
- 4 E Yablonovitch, T J Gmitter. Donor and acceptor modes in photonic band structure[J]. Phys Rev Lett, 1991, 67(24): 3380-3383.
- 5 P Halevi, F Ramos-Mendieta. Tunable photonic crystal with semiconducting constituents[J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(9): 1875-1878.
- 6 Hideaki Taniyama. Waveguide structures using 1-D photonic crystal[J]. Appl Phys, 2002, 91(6): 3511-3515.
- 7 Philip Russell. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299

(5605): 358-362.

- 8 I Kenji, N Susumu. Manipulation of photons at the surface of three-dimensional photonic crystals[J]. Nature, 2009, 460(7253): 367-370.
- 9 Xiong Cuixiu, Yao Yingbo, Jiang Lianjun, *et al.*. Realization of single mode propagation using 1-D rectangular restricted photonic crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 052302.
- 熊翠秀, 姚映波, 蒋练军, 等. 用一维矩形受限光子晶体实现单模传输[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 052302.
- 10 Yuanyuan Chen, Ying Fang, Shanhong Huang, *et al.*. Surface tamm states in one-dimensional photonic crystals containing anisotropic indefinite metamaterials[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(6): 061602.
- 11 V I Kopp, Z Q Zhang, A Z Genack. Large coherence area thin-film photonic stop-band lasers[J]. Phys Rev Lett, 2001, 86(9): 1753-1756.
- 12 Feng Chen, Feng Guoying, Zhou Hao, *et al.*. Characteristic analysis on photonic crystal laser cavity with 1-D photonic bandgap[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0802009.
- 冯琛, 冯国英, 周昊, 等. 一维光子带隙光子晶体激光腔的特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0802009.
- 13 Li Xin, Yang Ming, Guo Shiliang, *et al.*. Characteristics of photonic-crystal waveguides with random media[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1006001.
- 李欣, 杨明, 郭士亮, 等. 含随机介质的光子晶体波导特性[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1006001.
- 14 Ba Nuo. Light transmission properties of one-dimensional function photonic crystal[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0606001.
- 巴诺. 一维函数型光子晶体的光学传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0606001.
- 15 Liu Qineng. Analytical study on total reflection tunnel effect of 1-D photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0219002.
- 刘启能. 一维光子晶体的全反射隧穿效应的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0219002.
- 16 Junfei Yu, Yifeng Shen, Xiaohan Liu, *et al.*. Absorption in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystals[J]. Phys Condensed Matter, 2004, 16(7): 51-56.

栏目编辑:王晓球