

# 镜像对称结构一维光量子阱的光传输特性

苏安<sup>1</sup>, 覃宗定<sup>1</sup>, 高英俊<sup>2</sup>

(1. 河池学院物理与电子工程系, 广西 宜州 546300; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:**用传输矩阵法研究对称结构一维光量子阱  $(AB)_m(ABCBA)_n(BA)_m$  的光传输特性, 结果发现:随  $n$  的增加, 光量子阱  $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$  的透射谱出现  $(2n-1)$  条共振透射峰, 量子化效应明显; 量子阱内部出现很强的局域电场: 当  $n=1$  时, 光量子阱  $(AB)_m(ABCBA)_1(BA)_m$  内部局域电场强度随着  $m$  增加而增强, 而当  $m=5$  时, 光量子阱  $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$  内部局域电场强度不随  $n$  的变化而改变, 但局域范围扩大。这些光学传输特性, 为光子晶体设计新型光学器件提供指导。

**关键词:**光子晶体; 量子阱; 透射谱; 电场分布

**中图分类号:** O431 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.08.014

## Transmission properties of one-dimension photonic crystal quantum well with mirror symmetry structure

SU An<sup>1</sup>, QIN Zong-ding<sup>1</sup>, GAO Ying-jun<sup>2</sup>

(1. Department of Physics and Electronic Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China;

2. Department of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Using the transfer matrix method, the transmission properties of one-dimension photonic quantum well  $(AB)_m(ABCBA)_n(BA)_m$  with mirror symmetric structure is studied. Results show that with the increase of  $n$ ,  $(2n-1)$  resonance transmission peaks appear in the transmission spectra of photonic quantum well  $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ , and quantization effect is obvious. Strong electric field appear in the internal field quantum well. When  $n=1$ , the intensity of internal electric field of light quantum-well  $(AB)_m(ABCBA)_1(BA)_m$  increases with  $m$ , while  $m=5$ , intensity of internal electric field light quantum well  $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$  don't change with the change of  $n$ , but local area expands. These optical transmission properties provide guidance for the design of new optical device of photonic crystal.

**Key words:** photonic crystal; quantum well; resonance transmission spectra; electric field distribution

### 1 引言

自20世纪80年代光子晶体概念<sup>[1-2]</sup>提出以来,它新异的传输特性已经引起人们的广泛关注,并对其进行了大量的研究。因为光子晶体能禁止频率落在禁带中的光的传播,从而可实现人为操纵光的愿望。现在的很多研究结果已经表明,光子晶体将在光通信领域占有绝对的技术优势<sup>[3-4]</sup>。类似于半导体量子阱“裁剪”电子能带的特殊功能<sup>[5-6]</sup>,合理选择不同光子能带结构的光子晶体,也

可以构成光子晶体量子阱结构<sup>[7-8]</sup>。光量子阱结构对光子的量子限制作用而产生局域的光子态,这些被强烈局域的光子态在光量子阱的透射能带谱上表

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 50661001);广西自然科学基金项目(No. 2011GXNSFA018145,0991026);广西教育厅科研项目(No. 201012MS206);河池学院重点科研课题(No. 2011YAZ-N001)资助。

**作者简介:**苏安(1973-),男,副教授,主要从事光子晶体的研究。E-mail: suan3283395@163.com

**收稿日期:** 2011-01-10; **修订日期:** 2011-06-02

现为分立的共振透射峰,根据这些透射谱的特性可以设计高性能的新型量子光学器件<sup>[3-4,7-11]</sup>。本文选取对称结构一维光子晶体量子阱 $(AB)_m(ABCBA)_n(BA)_m$ 模型,用传输矩阵理论<sup>[3,7-8,11-13]</sup>,研究其能带结构及其所构成的光子量子阱结构的透射能带谱,以及光子量子阱内部的局域场,得到若干有实际指导意义的结果,这些结果对光子晶体设计新型量子光学器件有一定的指导作用。

## 2 光子晶体模型及其计算方法

### 2.1 一维光子晶体模型

选取镜像对称结构一维光子晶体 $(AB)_m(ABCBA)_n(BA)_m$ 模型为研究对象,其中A、B、C介质的折射率和厚度分别取值如下: $n_A = 1.38, n_B = 2.35, n_C = 1.38, d_A = 281 \text{ nm}, d_B = 165 \text{ nm}, d_C = \lambda_0/n_C$ ,即C介质层的光学厚度等于光子晶体的中心波长(中心波长 $\lambda_0$ 是指光子晶体禁带中心频率 $\omega_0$ 所对应的波长,本模型及参数对应的 $\lambda_0 = 2(n_A d_A + n_B d_B) = 1551.1 \text{ nm}, \omega_0 = 1.2153 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ,属于红外光波范围)。m和n分别为光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 和 $(ABCBA)_n$ 的重复周期数,m和n可为任意正整数。

### 2.2 传输矩阵法

光在介质薄膜j层中传播可用的传输矩阵 $M_j$ 描述<sup>[3,8,13]</sup>:

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

考虑TE波正入射时,式(1)中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j, \eta_j = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}n_j, n_j$ 和 $d_j$ 分别为第j(j=A,B,C)层介质的折射率和厚度, $\lambda$ 为真空中光波长。则光在 $(AB)_m(ABCBA)_n(BA)_m$ 一维光子晶体中传播的总传输矩阵为:

$$M = (M_A M_B)^m (M_A M_B M_C M_B M_A)^n (M_B M_A)^m \\ = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过矩阵M可得到光在光子晶体传播的透射系数和透射率分别为:

$$t = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_i + m_{21} + m_{22}\eta_i}, T = |t|^2 \quad (3)$$

式中, $\eta_0$ 和 $\eta_i$ 分别为入射介质和出射介质的磁导率。当光子晶体两侧为空气时, $\eta_i = \eta_0 = \sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}$ 。

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 光子晶体量子阱能带特性

应用传输矩阵法理论通过 Matlab 编程计算模

拟,可得光子晶体 $(ABCBA)_{10}$ 和 $(AB)_5(BA)_5$ 透射能带结构谱,如图1所示,图中频率用归一化单位 $\omega/\omega_0$ 。

从图1可知,在 $0.80 \sim 1.20 \omega/\omega_0$ 范围内,由于一维光子晶体 $(ABCBA)_n$ 的能带中心和 $(AB)_m(BA)_m$ 的禁带中心重合于 $1.0 \omega/\omega_0$ 处,且能带完全处于禁带中,于是构成一个以中心频率 $1.0 \omega/\omega_0$ 处为对称中心的光子晶体量子阱结构。 $(AB)_m(BA)_m$ 是光子量子阱结构的垒, $(ABCBA)_n$ 则是光子量子阱结构的阱。

图1(b)中心频率处出现一条完全透射峰,是镜像对称结构光子晶体 $(AB)_5(BA)_5$ 的透射谱特征<sup>[7,14]</sup>。

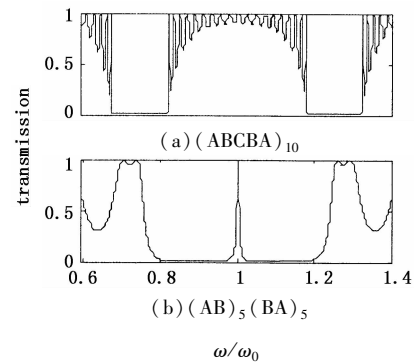


图1 一维光子晶体的透射能带谱

Fig. 1 transmission spectrum for one-dimensional photonic crystals

### 3.2 光子量子阱的透射能带谱

图2是一维光子晶体量子阱结构 $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ 的光子透射能带谱(周期取值 $m=5, n=1 \sim 5$ ),其反映了光子量子阱结构的光透射特性。从图2中可知:

(1) 在 $0.80 \sim 1.20 \omega/\omega_0$ 禁带范围内,以 $1.0 \omega/\omega_0$ 为对称中心,分布着一套透射峰的数目和位置随n变化的透射谱,透射峰数目为 $(2n-1)$ 条,透射峰很窄,透射率均达到100%。此光子量子阱结构的光传输特性,可用于设计高质量、高灵敏度的量子光学滤波器件。透射谱形成的原因可分析如下:

(a) 由图1可知,在 $0.80 \sim 1.20 \omega/\omega_0$ 频率区域处,阱层光子晶体 $(ABCBA)_n$ 的能带完全处于垒层光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$ 的禁带中,构成光子量子阱结构,则频率落在量子阱频率范围内的光在光子晶体中传播时,将被光子量子阱的垒层所限制而禁止传播,被局域在阱层中,此时光子的行为类似于半导体量子阱中的电子。由于量子阱的这种限制效应将导致频率的量子化,于是光以共振隧穿的方式透过光

量子阱<sup>[7-8,11,14]</sup>,形成如图 2 所示的共振透射谱。值得关注的是,在这些量子局域态中,光是可以完全透过的,体现为透射峰的透射率均为 100%。于是可以通过调节阱层晶体(ABCBA)<sub>n</sub>的重复周期数 *n* 来控制透过峰的数目和位置,实现量子光学滤波功能。

(b)若把(ABCBA)<sub>n</sub>看成是插入(AB)<sub>5</sub>(BA)<sub>5</sub>光子晶体内的另一块光子晶体,则当 *n* = 1 时,光子量子阱(AB)<sub>5</sub>(ABCBA)<sub>1</sub>(BA)<sub>5</sub>可表示成(AB)<sub>6</sub> $\square$ (BA)<sub>6</sub>,即形成以 C 为对称中心的一维光子晶体结构,C 也可以看成是插入其中的一层缺陷,于是禁带中心频率 1.0  $\omega/\omega_0$  处出现一条透射率为 1 的完全透射峰(缺陷模),如图 2(a)所示。当 *n* = 2 时,(AB)<sub>5</sub>(ABCBA)<sub>2</sub>(BA)<sub>5</sub>可以看成是在镜像对称光子晶体(AB)<sub>6</sub> $\square$ BAAB $\square$ (BA)<sub>6</sub>结构,带边框部分即为光子晶体内的两块缺陷,于是在透射谱中出现相应的三条透射峰。*n* = 3,4,⋯可依次类推<sup>[3]</sup>。

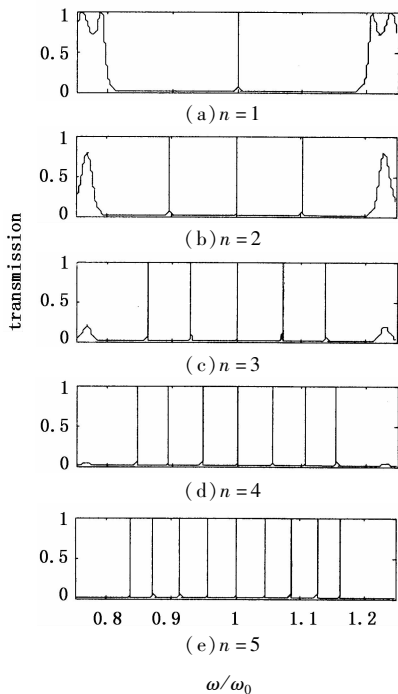


图 2 一维光子晶体量子阱(AB)<sub>5</sub>(ABCBA)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub>的透射能带谱  
Fig.2 transmission spectrum for (AB)<sub>5</sub>(ABCBA)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub> photonic quantum well

(2)随着 *n* 的增加,中心频率 1.0  $\omega/\omega_0$  处的透射峰会越来越窄,即品质越来越高。图 3 是 *n* = 1, 2, 5 时中心频率处透射峰带度的变化图。则可以通过调节重复周期数 *n* 实现提高中心频率处透射峰品质的目的。

(3)随着 *n* 的增加,光子量子阱结构(AB)<sub>5</sub>(AB-

CBA)<sub>n</sub>(BA)<sub>5</sub>的禁带(阱)逐渐变宽,禁带所占频率范围从 *n* = 1 时的 0.80 ~ 1.20  $\omega/\omega_0 < \Delta\omega = 0.40 \omega/\omega_0 >$ ,增加到 *n* = 5 时的 0.69 ~ 1.31  $\omega/\omega_0 < \Delta\omega = 0.62 \omega/\omega_0 >$ ,于是可以通过增加阱层光子晶体的厚度以获得更宽的光子禁带。同时,随着 *n* 的增加,透射峰逐渐以中心频率处为中心向两侧生长,但两侧的各透射峰之间距离逐渐变小。即随着 *n* 的增加,量子阱结构中被量子化的频率之间越密集。

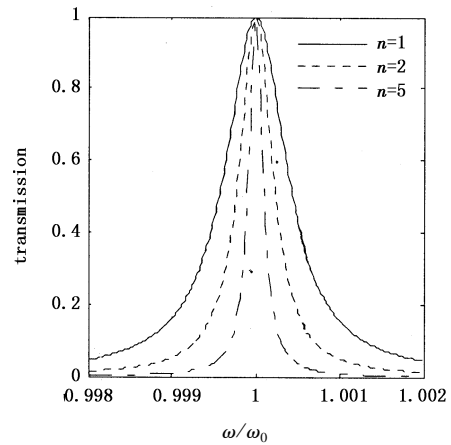


图 3 中心频率处透射峰品质随 *n* 的变化  
Fig.3 quality of transmission peak in the center frequency change with *n*

#### 4 光子量子阱的内部电场分布

为了更加清晰地分析(AB)<sub>m</sub>(ABCBA)<sub>n</sub>(BA)<sub>m</sub>光子量子阱结构透射谱的形成机理,我们进一步对光子量子阱的内部电场分布情况进行计算分析。

##### 4.1 周期数 *m* 对局域电场的影响

其他参数不变,取 *n* = 1, *m* = 1 ~ 5 时,可得如图 4 所示的(AB)<sub>m</sub>(ABCBA)<sub>1</sub>(BA)<sub>m</sub>的内部电场分布。

从图 4 可见,局域态(透射峰)对应频率处出现很强的局域电场<sup>[8,11,15-16]</sup>。这是因为,在光子量子阱结构所处的频率范围内,由于垒层光子晶体对在阱层中传播的电磁波的产生强限制作用,将导致在阱层光子晶体中传播的光被强烈的局域限制,形成光的局域态。另外,从图中还看到,被强烈局域于阱层光子晶体中的光场,在介质 C 层范围内出现极大值,而在 C 层外围的电场分布则向两边越来越弱。并且,随着 *m* 增大,即两端垒层(AB)<sub>m</sub>(BA)<sub>m</sub>厚度的增加,在阱层光子晶体被局域的光场越强,从 *m* = 1 的  $|E/E_0| = 2.10$  增强到 *m* = 5 时的  $|E/E_0| = 17.65$ ,这种强电场局域现象将导致该位置的自发辐射显著增强,最终这些局域化量子态会产生共振隧穿,即光通过共振隧穿的方式透过光子晶

体<sup>[8,11,15-16]</sup>,则与共振隧穿频率共振的光都可以通过光子晶体,体现为透射谱中分立而锋锐的透射峰。

因此,可通过改变垒层光子晶体的厚度,以调整缺陷层内部局域电场强度,最终达到调节共振隧穿模特征的目的,这对一维光子量子阱设计新型光学器件有着积极的参考和应用价值。

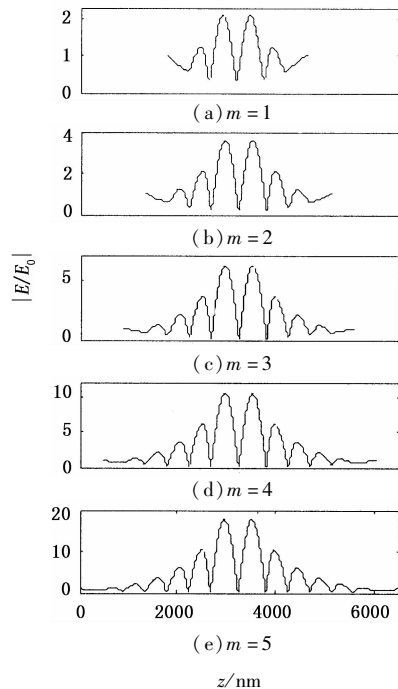


图4 一维光子晶体量子阱 $(AB)_m(ABCBA)_1(BA)_m$ 内部电场分布

Fig.4 electric field distributions of  $(AB)_m(ABCBA)_1(BA)_m$  photonic quantum well

#### 4.2 阱层光子晶体厚度对局域电场的影响

其他参数不变,取 $m=5, n=1\sim 5$ 时,可得如图5所示的 $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ 的内部电场分布。从图5可见:

(1)随着 $n$ 的增大,阱层光子晶体 $(ABCBA)_n$ 厚度增加,被限制于阱中的局域电场强度不变,均为 $|E/E_0|=17.65$ ,但是局域的范围扩大了。

(2)局域电场在缺陷层C位置达到极大值,即极大值位置和数目与C层数相等: $n=1$ 时,光场在出现一个局域场最大值, $n=2$ 时,出现两个局域场最大值, $n=3, \dots$ 。局域场强均等于17.65,而且都是对应C层所在的位置。形成原因可分析为:虽然光子量子阱的阱层厚度增加,但垒层的厚度不变,一直为 $(AB)_5(BA)_5$ ,则对阱层内光子晶体的限制强度不变,因此局域场强度也不变。

计算还发现,只要保持垒层光子晶体及C层的厚度不变,不论改变C层的折射率还厚度,阱内局域场场强均不变。而当改变C层的厚度

时,局域场强度会产生改变。根据此光子量子阱的局域场特性,可以根据实际设计需要,人为的调节控制一定范围内的局域电场,最终达到调节透射谱特性的目的,这在光学器件设计上有一定的指导价值。

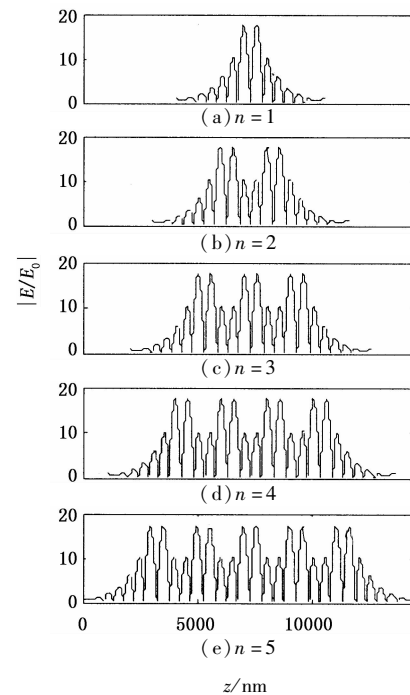


图5 一维光子晶体量子阱 $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ 的内部电场分布

Fig.5 electric field distributions of the defect states for photonic crystals  $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$

## 5 总结

(1)随 $n$ 的增加,一维光子量子阱 $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ 的透射谱出现 $(2n-1)$ 条窄带共振透射峰,呈现明显的量子化效应,可实现多通道滤波的功能。

(2)随 $n$ 的增加,中心频率处的透射峰品质越来越高。

(3)随着垒层厚度的增加,一维光子量子阱 $(AB)_m(ABCBA)_1(BA)_m$ 内部局域电场强度增强,且在C层介质内达到极强。

(4)随着阱层厚度的增加,一维光子量子阱 $(AB)_5(ABCBA)_n(BA)_5$ 内部局域电场强度不变,但是局域范围扩大。当C层介质的光学厚度改变时,光子量子阱内局域场强度发生变化。

此光子晶体量子阱结构的传输特性及内部电场局域规律,对光子晶体设计新型量子光学器件,具有一定的参考意义。

## 参考文献:

[1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-

- state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(20):2059-2061.
- [2] S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58(23):2486-2489.
- [3] Su An, Gao Yingjun. Filter characteristics of one-dimensional photonic crystal with complex dielectric constant [J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(6):1535-1538. (in Chinese)  
苏安, 高英俊. 含复介电常数一维光子晶体的滤波特性[J]. 中国激光, 2009, 36(6):1535-1538.
- [4] Chen Xianfeng, Jiang Meiping, Shen Xiaoming, et al. The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9):5709-5712. (in Chinese)  
陈宪锋, 江美萍, 沈小明, 等. 一维多缺陷光子晶体的缺陷模[J]. 物理学报, 2008, 57(9):5709-5712.
- [5] L Esaki, R Tus. Superlattice and negative differential conductivity semiconductors [J]. IBM J. Res. De. v, 1970, 14:61-65.
- [6] E E Mendez, K von Klitzing. Physics and applications of quantum wells and superlattices [J]. Natoasi, New York, 1987.
- [7] Su An, Gao Yingjun, Jiao Meina, et al. Transmission spectrum of photonic crystal quantum-well structure for realizable odd-passage filter [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2009, 30(3):394-398. (in Chinese)  
苏安, 高英俊, 焦美娜, 等. 可实现奇数通道滤波功能的光量子阱透射谱[J]. 发光学报, 2009, 30(3):394-398.
- [8] Qiao Feng, Zhang Chun, Wang Jun, et al. Photonic quantum-well structures: Multiple channeled filtering phenomena [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(23):3698-3700.
- [9] S Yano, Y Segwa, J S Bae, et al. Quantized state in a single quantum well structure of photonic crystals [J]. Phys Rev: B, 2001, 63(15):1-4.
- [10] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$  [J]. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(4):509-514.
- [11] Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan, et al. Theoretical simulation and transmission properties of 1-D photonic QW structure containing defect layers with negative refractive index [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(12):2245-2249. (in Chinese)  
董海霞, 江海涛, 杨成全, 等. 含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟[J]. 光学学报, 2007, 27(12):2245-2249.
- [12] Chen Yihang, Xu Qingzhen. Twin defect modes in one-dimensional photonic crystals with defect layers of multiple single-negative materials [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8):1498-1502. (in Chinese)  
陈溢杭, 徐清振. 多个单负材料缺陷一维光子晶体的孪生缺陷模[J]. 光学学报, 2007, 27(8):1498-1502.
- [13] Wang Hui, Li Yongping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica, 2001, 50(11):2172-2174. (in Chinese)  
王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2001, 50(11):2172-2174.
- [14] Su An, Gao Yingjun, Jiao Meina, et al. Study on odd-passage filter photonic crystal quantum-well structure [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3):311-314. (in Chinese)  
苏安, 高英俊, 焦美娜, 等. 具有奇数通道滤波功能的光子晶体量子阱结构研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(3):311-314.
- [15] Wang Tongbiao, Liu Nianhua. Band structures and electric fields of one-dimensional photonic crystals composed of alternate layers of left-handed and right-handed materials [J]. Acta Physica, 2007, 56(10):5878-5882. (in Chinese)  
王同标, 刘念华. 正负折射率材料组成的一维光子晶体的能带及电场[J]. 物理学报, 2007, 56(10):5878-5882.
- [16] Zhou Jingou, Du Guiqiang, Zhang Yawen, et al. Electromagnetic modes of thickness-modulated dual-periodic one-dimensional photonic crystals [J]. Acta Physica, 2005, 54(8):3703-3706. (in Chinese)  
周金苟, 杜桂强, 张亚文, 等. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2005, 54(8):3703-3706.