

文章编号: 0253-2239(2007)12-2245-5

含负折射率缺陷的光量子阱的透射特性及理论模拟*

董海霞¹ 江海涛^{2*} 杨成全¹ 石云龙^{1,2}

(¹ 大同大学固体物理研究所, 大同 037009
² 同济大学波耳固体物理研究所, 上海 200092)

摘要: 利用转移矩阵方法对含负折射率缺陷的一维光子晶体量子阱结构的透射特性进行了研究。结果表明, 当缺陷为偶数个时, 结构透射谱中有两个透射峰; 当缺陷为奇数个时, 透射谱中只有中心处一个透射峰, 且随着缺陷层数的增加, 该处峰的品质因子逐渐提高。因电磁波在缺陷处的强烈局域, 所以阱中局域态的透射率对缺陷的折射率有很强的依赖作用。通过控制入射光的强度可使缺陷的折射率发生微小的改变, 进而使局域态的透射率发生明显改变, 这样就可制作高效光开关。

关键词: 光电子学; 光量子阱; 转移矩阵法; 负折射率材料

中图分类号: O431; O734 文献标识码: A

Theoretical Simulation and Transmission Properties of One-Dimensional Photonic Quantum-Well Structure Containing Defect Layers with Negative Refractive Index

Dong Haixia¹ Jiang Haitao² Yang Chengquan¹ Shi Yunlong^{1,2}

(¹ Institute of Solid-State Physics, Datong University, Datong 037009
² Pohl Institute of Solid-State Physics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: By using transfer-matrix method, the transmission properties of a one-dimensional photonic quantum-well structure containing defect layers with negative refractive index are studied. It is found when the number of defects is even, there are two transmission peaks in the photonic quantum well, and when the number is odd, only one transmission peak appears in the center frequency. The Q factor of the transmission peak in the center frequency advances when defect layers increase. Due to the strong localization of electromagnetic wave at defect regions, the transmission of confined states are greatly dependent on the refractive index of the defects. The refractive index of the defects is changed slightly by controlling light intensity, then the transmission of confined states is changed obviously. High-efficiency optical switches can be realized by using this property.

Key words: optoelectronics; photonic quantum well; transfer-matrix method; negative-refraction materials

1 引 言

光子晶体是周期性排列的介电结构^[1]。它最基本的特征就是具有带隙结构, 频率落在带隙中的光波将被禁止传播。利用带隙特性, 光子晶体可制作光开关、光学延迟线、光滤波器等^[2~5]。若在光子晶体中加入周期性缺陷, 光波就可以在缺陷中传播, 故对光子晶体缺陷模^[6~8]的研究相当重要。近几年来, 在光子晶体中周期(或非周期)分布的光子微腔形成的耦合腔引起人们的关注^[9]。将具有不同光子

带隙的光子晶体组合在一起可形成光量子阱, 阱中出现的局域光子态可形成多通道滤波器。在光子晶体量子阱中, 利用非线性缺陷可制作光学开关^[10,11], 这在非线性光学器件中应用非常广泛。

负折射率材料是近年来国际上非常活跃的研究领域。它是由 Veselago 在 1967 年首先研究并提出的。负折射率材料的介电常量 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值, 也被称为双负材料。电磁波在该材料中传播时, 电矢量 E 、磁矢量 H 和波矢 k 构成左手螺旋关

* 山西省高科技开发项目(2007146)和山西省留学回国人员科研资助项目(2005063)资助课题。

作者简介: 董海霞(1977—), 女, 山西人, 讲师, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: tzhdxh@sohu.com

** 通信联系人。E-mail: jiang-haitao@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2007-03-13; 收到修改稿日期: 2007-07-02

系,故它还被称为左手材料。由于满足左手法则,这种材料有许多新奇的物理现象,如负折射、逆多普勒效应等。利用这种反常的电磁学性质可以得到许多新的光学现象并设计、制作新的光学器件。

文中主要讨论了在一维光子晶体中加入负折射率缺陷形成的光子晶体量子阱结构,当缺陷个数以及缺陷折射率变化时的透射谱,得出了一些相异于正常材料量子阱结构的透射特性。

2 计算方法

当电场方向位于 y 轴的横电(TE)波从空气中正入射到该结构时,位于 $z + \Delta z$ 和 z 处的电场和磁场分量通过转移矩阵^[1,9,12]相连接:

$$\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega) = \begin{bmatrix} \cos(k_i \Delta z) & -\frac{\mu_i}{n_i} \sin(k_i \Delta z) \\ \frac{n_i}{\mu_i} \sin(k_i \Delta z) & \cos(k_i \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $k_i = (\omega/c)n_i$, i 对应不同的材料, c 为真空中的光速, μ_i 为材料的磁导率,正常材料 $\mu_i = 1$ 。若 $n_i > 0$ 时, $k_i > 0$, 矩阵 $\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega)$ 为正常材料的转移矩阵。若 $n_i < 0$ 时, $k_i < 0$, 矩阵 $\mathbf{M}_i(\Delta z, \omega)$ 则为负折射率材料的转移矩阵。假设连接入射端和出射端电磁场的矩

阵为

$$\mathbf{X}_N(\omega) = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j(\Delta z, \omega), \quad (2)$$

其中 N 表示结构的总层数。经过计算,可得结构的透射率为

$$T = \left| \frac{2}{(x_{11} + x_{22}) + i(x_{12} - x_{21})} \right|^2, \quad (3)$$

其中 x_{ab} ($a, b = 1, 2$) 为 $\mathbf{X}_N(\omega)$ 的矩阵元。

3 光子晶体量子阱结构的透射特性

考虑 $(AB)_m(ABAC)_nABA(BA)_m$ 光子晶体量子阱结构,其中 A、B 是正常材料,缺陷 C 是负折射率材料, n 为缺陷的个数。选取 $m = 8$, 光子晶体量子阱结构为 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 。令 A、B、C 的折射率和光学厚度分别为 $n_A = 1.5, n_B = 2.5, n_C = -1.5, n_A d_A = n_B d_B = 0.25\lambda_0, n_C d_C = -0.5\lambda_0$ (λ_0 指光子晶体禁带中心频率 ω_0 所对应的波长)。

若 $n_C = 1.5$ 时,磁导率 $\mu_C = 1$, 该结构就成为正常材料组成的光子晶体量子阱结构,其透射谱如图 1 所示。当缺陷数目 n 改变时,阱中局域态的个数也发生相应变化,且刚好等于 n ^[10]。这是因为当 n 增加时,强烈局域在缺陷处的电磁波就会发生耦合作用,致使简并的杂质能级发生分裂,分立出多个能级。

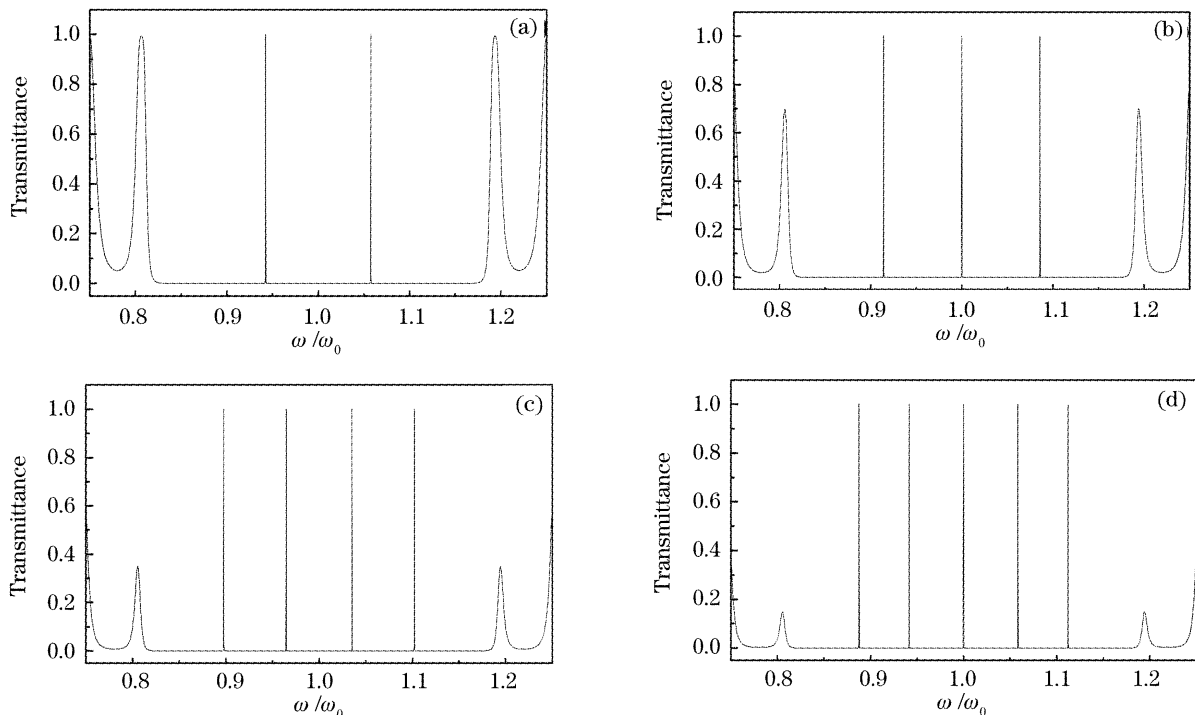


图 1 $n_C = 1.5$ 时,结构 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 的透射谱。(a) $n = 2$, (b) $n = 3$, (c) $n = 4$, (d) $n = 5$

Fig. 1 Transmission spectrum of $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ with $n_C = 1.5$. (a) $n = 2$, (b) $n = 3$, (c) $n = 4$, (d) $n = 5$

图 2 是 $n_C = -1.5$ 时,结构 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 在 n 取不同值时的透射谱。这时 C 的磁导率

$\mu_C = -1$ 。从图 2 清楚看出, n 为奇数时,光子晶体量子阱结构的透射谱中只在中心频率处出现一个局域态; n 为

偶数时,阱中出现了两个关于中心频率处对称的局域态,且这两个局域态随着 n 值的增加,会向中心频率

处逐渐靠拢,这样就可以根据实际需要的频率值来对 n 进行调整。

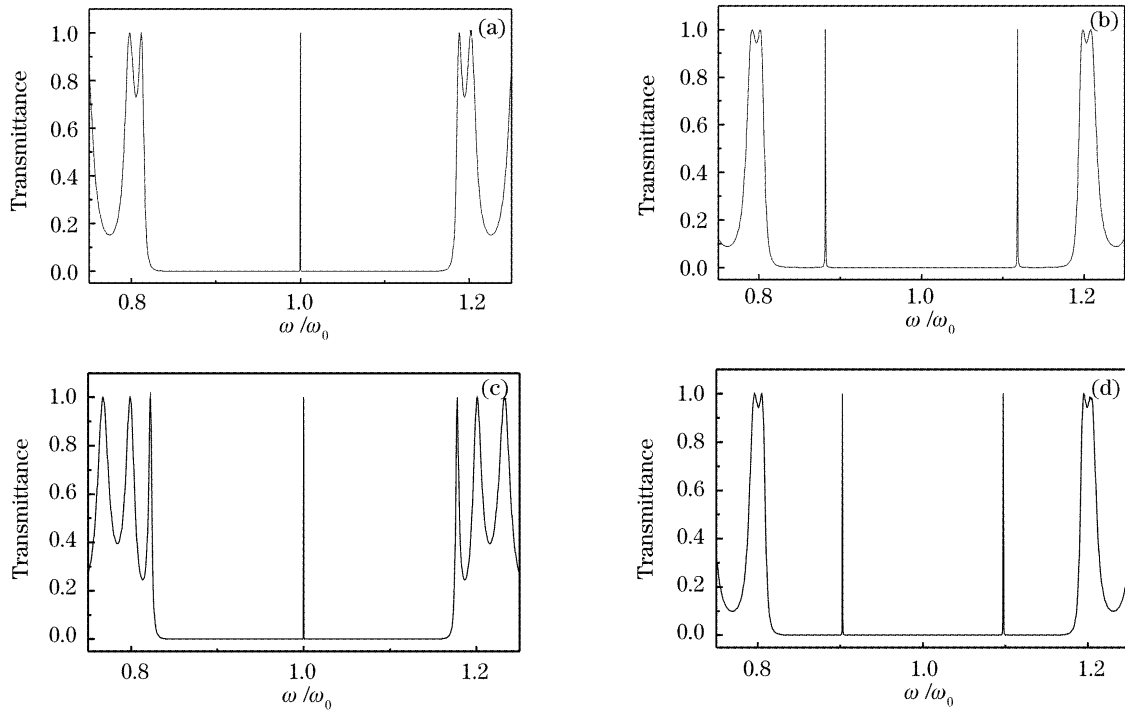


图 2 $n_c = -1.5$, 结构 $(AB)_8(ABAC)_n ABA(BA)_8$ 的透射谱。(a) $n=3$, (b) $n=4$, (c) $n=5$, (d) $n=6$

Fig. 2 Transmission spectrum of $(AB)_8(ABAC)_n ABA(BA)_8$ with $n_c = -1.5$. (a) $n=3$, (b) $n=4$, (c) $n=5$, (d) $n=6$

通过比较,发现这两种结构的透射特性存在明显的差异。因负折射率材料不可避免的存在色散,故设缺陷 C 具有色散^[4]:

$$\epsilon_c = \mu_c = 1 - \alpha/\omega^2, \quad (4)$$

这种色散材料可以通过等效电路模型的微带传输线来实现^[12]。取 $\alpha = 3\omega_0^2$, 其余参量都不变,这时 $n_c = -\sqrt{\epsilon_c \mu_c}$ 。图 3 是 C 具有色散时,结构的透射谱。从图 3 看出,结构仍具有 $n_c = -1.5$ 时的透射性质。

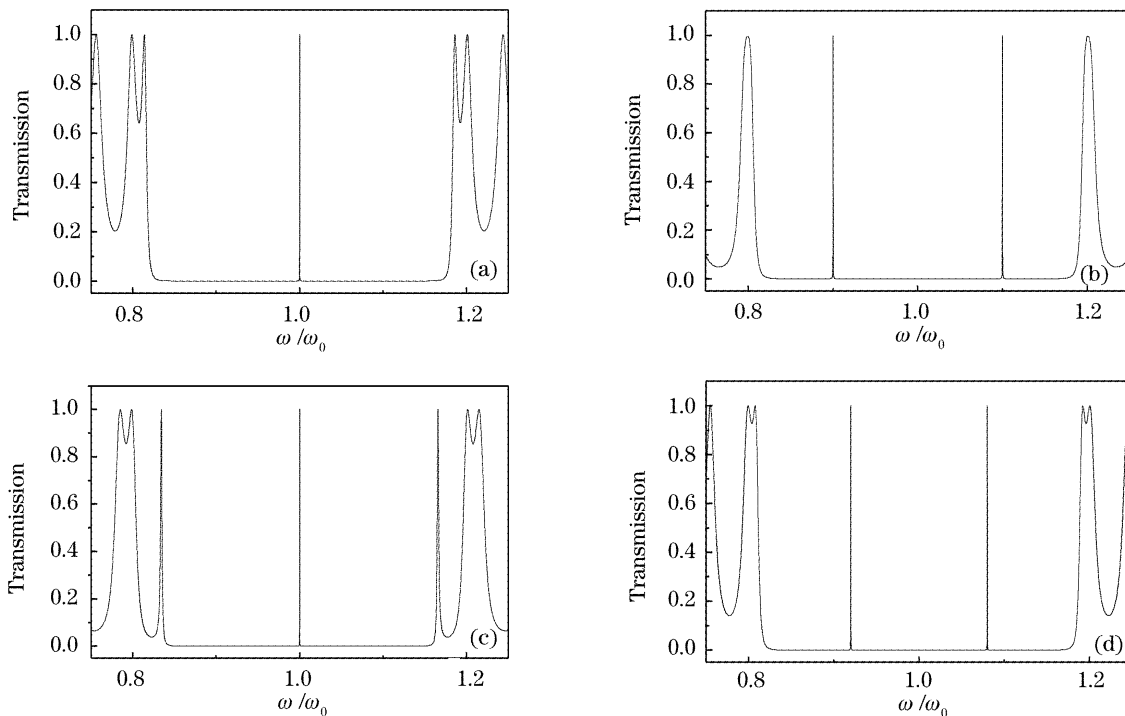


图 3 缺陷有色散时,结构的透射谱。(a) $n=3$, (b) $n=4$, (c) $n=5$, (d) $n=6$

Fig. 3 Transmission spectrum of the structure with dispersive defects. (a) $n=3$, (b) $n=4$, (c) $n=5$, (d) $n=6$

含负折射率缺陷的光量子阱结构具有这种特殊的透射性质,是因为电磁波在负折射率材料中传播时,相速度与群速度的传播方向相反,其相位会随波的传播不断消减而产生一种相位补偿效应。在结构 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 中, $n_A d_A = n_B d_B = 0.25\lambda_0$, $n_C d_C = -0.5\lambda_0$, 根据相位补偿,当 n 取 1, 2, 3 时,结构中缺陷部分的光学厚度可分别等效为 $0.25\lambda_0, 0.5\lambda_0, 0.75\lambda_0$, 进而使结构透射谱呈上述规律变化。正是由于双负材料的这种相位补偿效应才使得含负折射率缺陷的光子晶体有着一些新奇的物理现象。

利用含负折射率缺陷的 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 结构中取奇、偶数时的透射特性,可分别制作发光二极管、单频滤波器和双波长垂直腔表面发射激光器等光学器件。

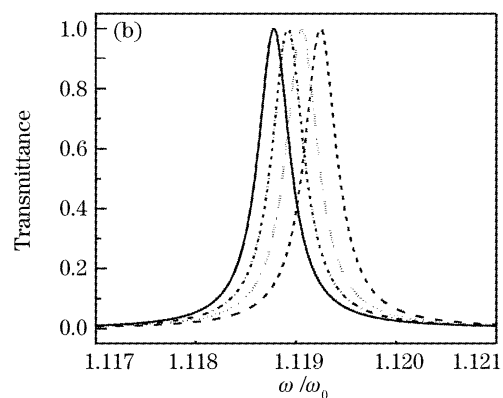
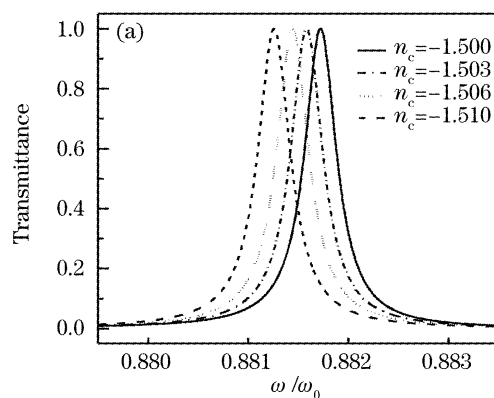


图 4 透射谱中的第一个(a)和第二个(b)局域态随 n_C 的变化

Fig. 4 Dependence of the first (a) and second (b) confined states on the change of n_C

图 5 给出了阱中心频率处透射峰随缺陷层数 n 的变化, n 分别取 1, 3, 5。从图中可以看出:随着 n 的增加,中心频率处透射峰的品质因子有所提高。这样若负折射率缺陷层含非线性,就可以通过增加

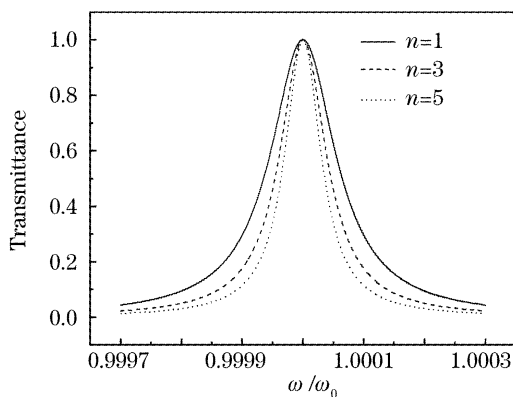


图 5 中心频率处透射峰随 n 的变化

Fig. 5 Transmission peak in the center frequency change with n

4 光开关的形成

在含负折射率缺陷的光量子阱结构中,由于电磁波在缺陷处的强烈局域,使得阱中局域态的透射率对缺陷有很大依赖作用。若缺陷的折射率稍微发生改变,局域态的透射率就会发生非常明显的变化。利用这个特性可以设计光开关。

考虑结构 $(AB)_8(ABAC)_4ABA(BA)_8$ 在无色散时的情况。假设缺陷 C 含有非线性,则可通过控制光照强度来稍微改变 C 的介电常量,那么 n_C 也相应发生微小变化,从而使阱中的两个局域态透射率发生变化。

图 4(a)、图 4(b)分别是第一个和第二个局域态的透射率随着 n_C 的变化图。图中当 n_C 从 -1.500 变化到 -1.510 时,局域态的透射率相应的急剧下降,当减小到一定程度,那么光学开关就可以形成。

缺陷的层数来降低光学开关的阈值。

5 结 论

含负折射率缺陷的一维光量子阱结构 $(AB)_8(ABAC)_nABA(BA)_8$ 中,当加入奇数个缺陷时,阱中中心频率处只存在一个透射峰;当加入偶数个缺陷时,阱中就出现两个透射峰。利用这两种透射特性分别可以制作单频滤波器和双波长垂直腔表面发射激光器等光学器件。此外,由于电磁波在缺陷处的强烈局域作用,使得阱中局域态的透射率随着缺陷层折射率的变化非常明显。这样通过控制入射光强,可以微小改变缺陷介电常量而形成高效的光学开关。并且通过增加双负缺陷层的层数,可以提高中心频率处透射峰的品质因子,降低光开关的阈值。

致谢 感谢同济大学物理系陈鸿教授在本文写作中

给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 E. Lidorikis, C. M. Soukoulis. Pulse-driven switching in one-dimensional nonlinear photonic band gap materials; a numerical study[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **61**(5): 5825~5829
- 3 Satoshi Nishikawa, Sheng Lan, Naoki Ikeda *et al.*. Optical characterization of photonic crystal delay lines based on one-dimensional coupled defects[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(23): 2079~2081
- 4 Shiyao Zhu, Nianhua Liu, Hang Zheng *et al.*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(1~4): 139~144
- 5 Feng Qiao, Chun Zhang, Jun Wang *et al.*. Photonic quantum-well structures; multiple channelled filtering phenomena [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23): 3698~3700
- 6 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1157~1160 (in Chinese)
方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1157~1160
- 7 Ma Hemei, Xu Zhenyu, Zhang Ruoqing. Band structure analysis of one-dimensional photonic crystals with continuous index of refraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 914~917 (in Chinese)
马荷梅, 许震宇, 张若京. 折射率连续周期分布一维光子晶体的带隙分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 914~917
- 8 Sun Zhihong. The study of the defect modes and coupling characteristics of photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 984~989 (in Chinese)
孙志红. 光子晶体局域缺陷模及耦合特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 984~989
- 9 Dong Haixia, Jiang Haitao, Yang Chengquan *et al.*. Properties of impurity band in one-dimensional photonic crystal coupled-resonator containing defect layers with negative refractive index [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(6): 2777~2780 (in Chinese)
董海霞, 江海涛, 杨成全 等. 含双负缺陷的一维光子晶体耦合腔的杂质带特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(6): 2777~2780
- 10 Jiang Haitao, Chen Hong, Liu Nianhua *et al.*. Engineering photonic crystal impurity bands for multiple channelled optical switches[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(1): 101~103
- 11 Hu Shuilong, Xu Xuming, Yu Tianbao. The single filtering and multiple channelled switches in photonic quantum-well structures [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 1004~1006 (in Chinese)
胡水龙, 徐旭明, 于天宝. 光量子阱单滤波、多通道开关[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 1004~1006
- 12 Haitao Jiang, Hong Chen, Hongqiang Li *et al.*. Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5386~5388