

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2013.02.020

光子晶体透射相位特性在全光开关和逻辑门中的应用

梁文耀, 徐梓浩, 梁俊铿, 陈亿菁

(华南理工大学理学院物理系, 广东 广州 510640)

摘要: 利用传输矩阵法详细研究了形如 $(HL)^k A(LH)^k$ 的含 N 个耦合缺陷一维光子晶体的透射相位特性。研究表明, $k = 0$ 时, 光子晶体的透射相移呈近线性变化; 而 $k \geq 1$ 时, 透射相位曲线在整个禁带范围内呈阶梯变化, 且在每个缺陷模附近透射相位随频率迅速改变, 其相移量约等于 π 。当在光子晶体中引入非线性折射率材料时, 折射率的微小改变将导致透射光产生 π 相移, 而且此相移过程中透射率接近于零, 这有利于减少动态啁啾对透射光信号的影响。光子晶体这种 π 透射相移特性可用于设计各种新型相位器件。根据这一原理, 设计了全光开关及逻辑门并讨论了其工作原理。

关键词: 光电子学; 光子晶体; 传输矩阵法; 相位; 全光开关; 逻辑门

中图分类号: O482.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2013)02-0250-07

Applications of the transmitted phase properties of photonic crystals in all-optical switches and logic gates

LIANG Wen-yao, XU Zi-hao, LIANG Jun-keng, CHEN Yi-jing

(Department of Physics, School of Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: By using the transfer matrix method, phase properties of the transmitted light were studied from one-dimensional photonic crystal coupled-defect structure with the form as $(HL)^k A(LH)^k$ containing N defects. It is found that for $k = 0$, the transmitted phase curve is nearly linear. While for $k \geq 1$, the transmitted phase curve is stepwise and changes drastically around each transmitted peak with the corresponding phase-shift π or so. When introducing nonlinear materials, slight change of refractive index will result in a perfect π -phase-transition. Moreover, the transmittance is near zero at the π -phase-transition, which is helpful to reduce the influence by the dynamic chirp. Such phase properties hold great promise in designing various phase devices. Based on these properties, the sensitive all-optical switch and logic gate devices were designed as examples.

Key words: optoelectronics; photonic crystals; transfer matrix method; phase; all-optical switches; logic gates

1 引言

全光开关和逻辑门器件是未来全光集成的关键器件之一, 利用光子与介质的相互作用对光传输过程进行有效的开/关控制, 并实现特定的逻辑运算功能, 在光通讯、光计算等领域具有非常广阔的应用前景。

基金项目: 华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金(2011ZM0087)资助项目

作者简介: 梁文耀 (1981-), 广东人, 博士, 讲师, 从事光子晶体与特异材料的研究。E-mail: liangwenyao@scut.edu.cn

收稿日期: 2012-02-20; **修改日期:** 2012-05-14

光子晶体是介质或金属材料构成的人工周期结构^[1~6], 其光子带隙和缺陷模的物理性质、光子晶体的制作及其应用等研究已引起人们的广泛关注。由于光子晶体独特的优越性, 基于光子晶体的全光开关和逻辑门器件已逐渐成为研究热点^[7~13]。光子晶体全光开关开创性的工作, 是利用频率位于一维光子晶体通带的超短脉冲来改变克尔非线性介质膜层的折射率以控制频率位于带边的信号光的通断^[7], 即利用带隙移动原理实现光开关。随后人们对此做了很多改进; 采用快速响应的非线性材料以减少响应时间^[9~11]; 引入缺陷模作为信号光的通道来减少开关所需的折射率改变量^[12]; 将控制光设置在杂质带以增强其电场局域, 从而减少泵浦强度^[13]。人们还提出了利用缺陷模内的动态迁移、光子晶体交叉波导来实现光开关和逻辑门器件^[14,15]。然而在已有光子晶体器件的相关报道中, 大部分是基于光子带隙、缺陷模和光子通带的光振幅和频率特性的, 基于光子晶体相位特性的相位器件较少报道。实际上, 光的相位特性和振幅特性同等重要, 光子晶体中存在许多和光的相位特性密切相关的重要物理现象, 如超光速、慢光等^[18,19]。近年来, 人们对光子晶体的反射相位特性开展了研究并设计了宽带玻片、光开关和温度传感器等相位器件^[20~22], 但是对透射相位特性的研究还比较少。本文主要研究一维耦合缺陷光子晶体的透射相位特性, 并结合其独特的 π 相移特性设计了灵敏的光开关和逻辑门器件。

2 光子晶体计算模型

本文以一维光子晶体为研究对象, 首先, 从最简单的单缺陷一维光子晶体出发, 其结构见图 1(a), 结构表达式为 $(HL)^3D(LH)^4$, 其中低、高折射率 (L 和 H) 及缺陷层 D 的折射率分别是 $n_L = 1.38$, $n_H = n_D = 3.6$, 各层的光学厚度分别是 $n_L d_L = n_H d_H = \lambda_0/4$, $n_D d_D = \lambda_0/2$, λ_0 为中心波长。设光子晶体以 Z 方向为轴向, 各介质层在 $x-y$ 平面内均匀无限扩展, 则可将其简化为 $x-z$ 平面内的计算模型, 如图 1(a) 所示。假设所研究的介质都是非磁性的, 且光子晶体两侧是空气, 则空气的介电常数和磁导率分别为 $\epsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1$, 设电磁波垂直于表面入射。

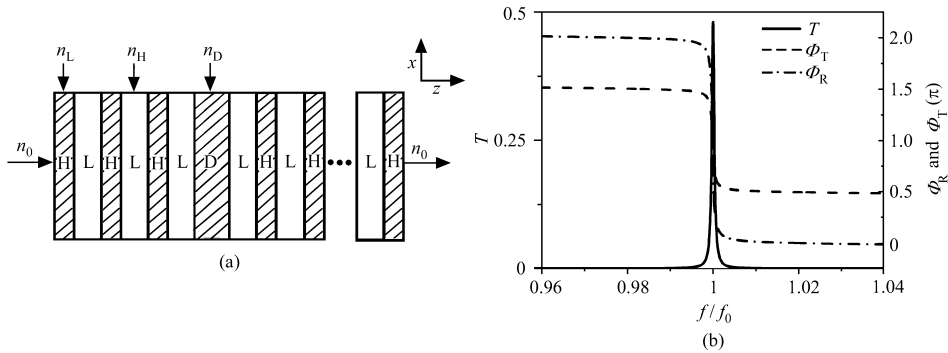


Fig.1 (a) The PC structure with single defect, $(HL)^3D(LH)^4$ with $n_L = 1.38$, $n_H = n_D = 3.6$, and the optical thickness $n_L d_L = n_H d_H = \lambda_0/4$, $n_D d_D = \lambda_0/2$ (λ_0 being the central wavelength), (b) The calculated transmittance T , reflectance phase Φ_R and transmitted phase Φ_T of the PC structure

根据光学传输矩阵法^[23], 对于 TE 波, 单层介质的特征矩阵为

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos(k_0 n_i d_i \cos \theta_i) & -\frac{j}{\eta_i} \sin(k_0 n_i d_i \cos \theta_i) \\ -j\eta_i \sin(k_0 n_i d_i \cos \theta_i) & \cos(k_0 n_i d_i \cos \theta_i) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, k_0 为真空中的波数, n_i 和 d_i 分别为该层介质的折射率和几何厚度, θ_i 为该层介质中电磁波的传播方向与介质表面法线的夹角, $\eta_i = \sqrt{\epsilon_i/\mu_i} \cos \theta_i$ 为第 i 层 TE 波的有效光学导纳, 则多层介质的特征矩阵为

$$M = \prod_{i=1}^N M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其反射系数和透射系数分别为

$$r = \frac{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{N+1} - m_{21} - m_{22}\eta_{N+1}}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{N+1} + m_{21} + m_{22}\eta_{N+1}} = |r|e^{i\Phi_R},$$

$$t = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{N+1} + m_{21} + m_{22}\eta_{N+1}} = |t|e^{i\Phi_T}, \quad (3)$$

其中, N 为光子晶体总层数, η_0 和 η_{N+1} 分别为光子晶体入射和出射介质的有效光学导纳. r 和 t 的相位分别称为反射相位和透射相位. 相应地, 光子晶体的反射率和透射率可表示为

$$R = |r|^2, \quad T = \frac{\eta_{N+1}}{\eta_0} |t|^2. \quad (4)$$

本文仅考虑正入射情况, 在上述 TE 波公式中令入射角为 0 即可. 利用传输矩阵法计算了上述单缺陷光子晶体结构的透射率和相位谱 (如图 1(b) 所示), 图中横坐标为归一化频率. 图 1(b) 表明, 单缺陷结构存在单个缺陷模, 对应该缺陷模的反射相位 (Φ_R) 变化量约为 $2\pi^{[21]}$, 而相应的透射相位 (Φ_T) 变化量仅为 π . 可见, 透射相位具有 π 相移的特点, 在后文中将主要探讨透射相位特性.

进一步研究形如 $(HL)^k A (LH)^k$ 的多耦合缺陷光子晶体的光学特性, 其中 $A = (HL)^3 D (LH)^3 L (HL)^3 D (LH)^3 L (HL)^3 D (LH)^3$ 拥有 3 个耦合缺陷 D, $k = 0, 1, 2 \dots$ 代表结构 A 两侧 (HL) 和 (LH) 子结构的周期数, 两侧为空气. 对于最简单的情况 $k = 0$, 图 2(a) 和 (b) 的实线分别给出了该结构的透射率和透射相位谱. 可见, 这一光子晶体结构产生了一个含 3 个子峰且透射率大于 95% 的矩形透射峰. 由图 2(b) 可以看出, 虽然每个子峰变化很小, 但其对应的透射相移仍为 π , 整个矩形峰内的总相移为 3π . 进一步计算表明, 含 N 个耦合缺陷的总透射相移为 $N\pi$. 由于相邻缺陷的相互耦合作用, 该矩形峰内的透射相位曲线呈近似线性变化.

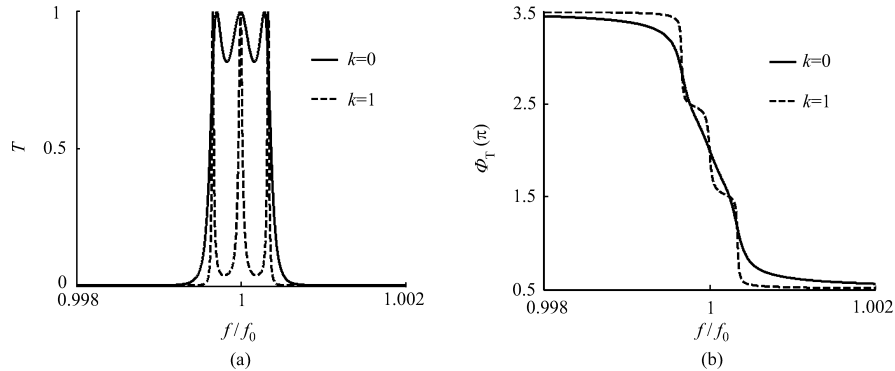


Fig.2 (a) Transmittance T and (b) Transmitted phase Φ_T for the coupled-defect PCs with the form as $(HL)^k A (LH)^k$ containing three defect layers. The solid and dashed lines are for the cases of $k = 0$ and 1, respectively

保持其它参数不变, 进一步计算 $k = 1, 2 \dots$ 的光子晶体结构的情况, 发现它们具有类似的光学性质. 但是随着结构 A 两侧 (HL) 和 (LH) 的周期数 k 逐渐增大, 它们的透射率和透射相位谱表现出不同于 $k = 0$ 时的特性. 不失一般性, 下面以 $k = 1$ 为例进行阐述, 其计算结果如图 2 中的虚线所示. 由图 2(a) 可看出, 当 $k = 1$ 时存在 3 个窄透射峰, 当工作频率偏离各缺陷模中心时, 透射率从 1 迅速下降至接近于 0, 这是由于 A 两侧存在的 (HL) 和 (LH) 子结构会导致缺陷模的 Q 值显著增加, 从而使得缺陷模的线宽

变窄。图 2(b) 清楚地表明对应于每一个缺陷模, 其透射相移仍为 π , 但是相应的透射相位曲线变化异常剧烈, 呈现阶梯状变化, 这与 $k = 0$ 时的线性变化明显不同。值得指出的是, 当时, 相邻透射峰间的相位差为 π , 且它们之间的极小透过率接近于 0; 这使得当引入非线性材料产生 π 相位跃变时, 相位剧变引起的啁啾几乎不会影响透射光信号。这些特性可用于设计各种各样的相位器件, 如光开关、反相器、逻辑门、相移键控调制器等。

此外, 我们还讨论了衬底 ($n_s = 1.52$) 对上述 $k \geq 1$ 多耦合缺陷光子晶体结构的影响, 计算结果如图 3 所示, 可以看出考虑衬底后缺陷模的最大透过率有所下降, 从 100% 下降至 95% 左右, 但对透射相位几乎没有影响。这是由于衬底的存在使得出射端的阻抗匹配程度有所降低, 从而导致透射率下降。下面, 我们将利用上述研究的光子晶体的透射相位特性设计全光开关及逻辑门器件。

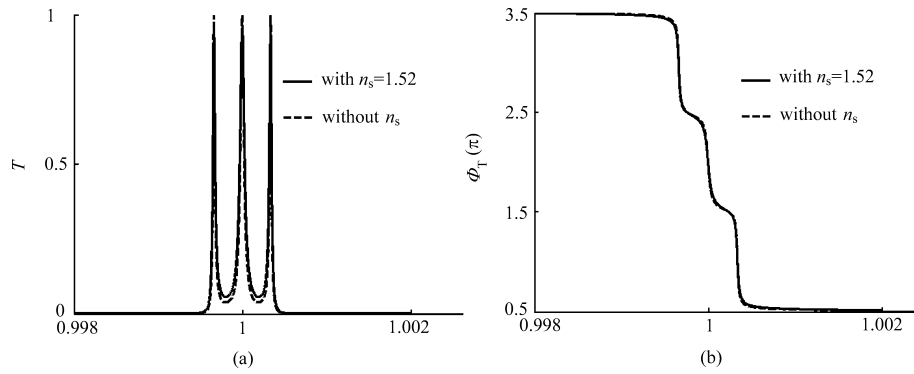


Fig.3 (a) The transmittance for the PC with or without a substrate, (b) The transmitted phase for the PC with or without a substrate. The refractive index of the substrate is $n_s = 1.52$

3 相位全光开关及逻辑门器件设计

以上述 $k = 1$ 的多耦合缺陷光子晶体结构为对象, 即 $(HL)^k A (LH)^k$, 其中 $A = (HL)^3 D (LH)^3 L (HL)^3 D (LH)^3 L (HL)^3 D (LH)^3$, 其衬底折射率为 $n_s = 1.52$, 为了控制信号光的透射相位, 选取高折射率层和缺陷层材料为折射率随入射光光强变化的三阶非线性光学材料^[24], 其折射率可以表示为 $n_H = n_D = n_l + n_{nl}(I)$, 其中 $n_l = 3.6$ 是折射率的线性部分, n_{nl} 是折射率非线性部分, I 是作用在局部非线性介质的光强。强光场使组成非线性介质的分子中的电子分布发生变化, 导致介质宏观电极化的变化, 从而使折射率发生变化。采用频率、振幅各异的信号光和泵浦光作用于光子晶体。利用泵浦光与非线性 Kerr 介质相互作用改变光子晶体的缺陷模位置, 从而控制透射信号光的相位。设入射到光子晶体的总光场为

$$E_{\text{total}} = E_s \cos(2\pi f_s t) + E_p \cos(2\pi f_p t), \quad (5)$$

其中 E_s 为信号光振幅, f_s 为信号光工作频率, E_p 为泵浦光振幅, f_p 为泵浦光频率。信号光频率可选取为图 4 中的第一或第二透射峰所在位置, 而泵浦光频率选取在禁带外部透射率较大且相对稳定的位置。当泵浦光作用时, 将引起 Kerr 材料产生 0.05% 的折射率改变, 从而导致频谱发生红移。图 4 中实线和虚线分别代表了折射率改变 0.05% 前后的情况。从图 4(a) 中可以看出, 折射率改变后的第二、三透射峰将红移至改变前的第一、二透射峰位置, 如图中 I 和 II 所示。由于相邻透射极大值的透射相位有着相反的相位, 即存在 π 相差, 因此经泵浦光泵浦后, 信号光的透射相位跟无泵浦光时相比将产生近乎完美的 π 相移。例如, 图 4 中位置 I 和 II 透射相位的改变量分别为 0.998π 和 1.003π 。因此, 设计基于 π 透射相移特性的光学器件时, 工作频率可以选择在位置 I 或 II。

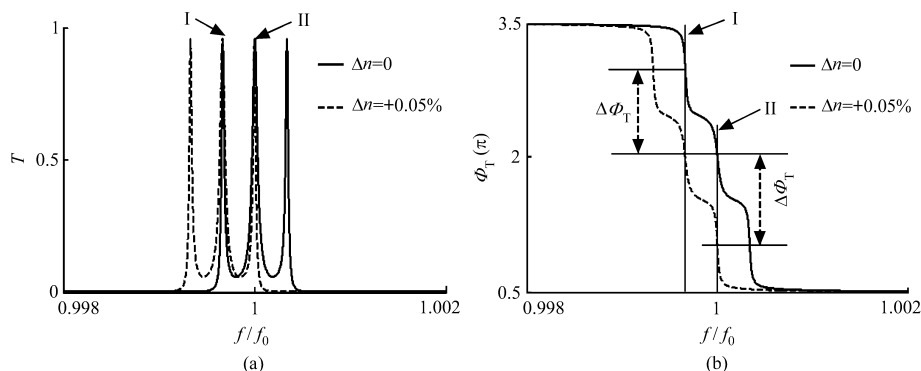


Fig.4 (a) Transmittance and (b) Transmitted phase Φ_T for the considered PC with a substrate ($n_s = 1.52$). $\Delta\Phi_T$ is the change of the transmitted phase with $\Delta n = 0.05\%$. The values of $\Delta\Phi_T$ are 0.998π and 1.003π at I and II, respectively

根据以上原理，我们采用两个上述光子晶体作为 Mach-Zehnder 干涉仪的两臂构建全光开关和光逻辑门，其原理如图 5 所示，Mach-Zehnder 干涉仪的两臂在结构上是完全对称的，以泵浦光作为控制信号。

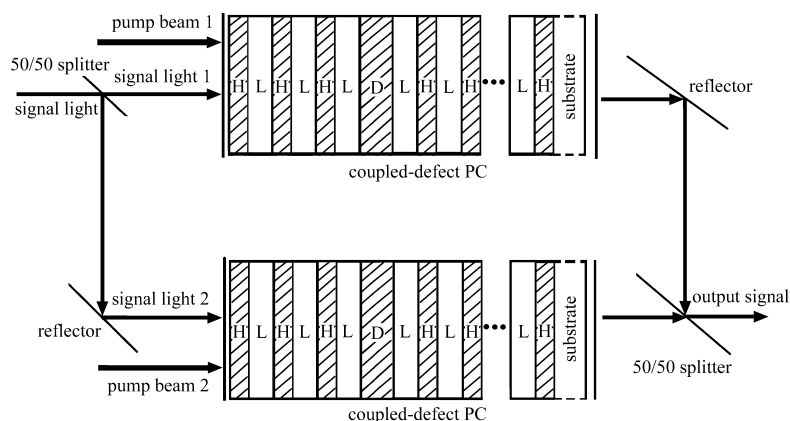


Fig.5 The schematic for the scheme of all-optical switches and logic gates based on the π -phase-transition properties

信号光经半透半反镜后分成等振幅的两路（信号光 1 和信号光 2）分别进入两个光子晶体。对于全光开关，仅需要对其中一路信号施加相应的泵浦光控制即可实现开关功能。例如考虑信号 1 的情况，当两臂均没有泵浦光存在时，两路信号在输出端为同相位叠加产生相干极大输出，光开关处于“开”状态。由于泵浦光 2 为 0，故信号光 2 经过光子晶体后透射相位为 ϕ_T ；同时施加泵浦光 1，由前述讨论可知，此时信号光 1 经过光子晶体后透射相位变为 $\phi_T + \Delta\phi_T$ ，将产生近乎 π 的相位变化 ($\Delta\phi_T \approx \pi$)，和信号光 2 之间为反相关系将产生相消极小输出，此时光开关处于“关”状态。从而实现光开关的功能。

进一步研究发现，图 5 的结构还可以用来实现同或逻辑门功能。当两臂的泵浦光同时为 0 时（即控制信号为“0,0”），到达输出端的两信号光具有相同的相位，产生极大输出，相当于输出信号“1”；当只在一臂施加泵浦光时（即控制信号为“0,1”或“1,0”），两透射的信号光之间存在相位差 π ，产生极小输出，相当于输出信号为“0”；当两臂同时施加泵浦光时（即控制信号为“1,1”），两信号光同时产生 π 相位变化，彼此间相差仍为 0，此时产生极大输出，相当于输出信号为“1”。输入信号和输出信号的关系概括于表 1 中。在上述基础上，还可以进一步实现其它逻辑门功能，例如在其中一臂前加入一个半波片，可实现异或逻辑门功能。

Table 1 XNOR functions of the proposed scheme

控制信号	泵浦光 1	0	1	0	1
	泵浦光 2	0	0	1	1
输出端信号光的相位关系		同相	反相	反相	同相
		输出极大	输出极小	输出极小	输出极大
输出信号		1	0	0	1

由于非线性材料的折射率改变存在一定的响应时间, 因此当光开关在状态切换时, 不可避免会产生动态啁啾, 可将其表达为

$$C(t) = f_t - f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (6)$$

其中 f_t 和 f_c 分别是载波的瞬时频率和中心频率。对于 1550 nm 工作波长来说, 其动态啁啾可达数 GHz。但是本文所采用的光子晶体结构在相邻透射极大间发生 π 相位跃变过程中, 其透射率接近于零, 这使得动态啁啾对透射光信号的影响几乎可以忽略不计, 从而保证器件能够稳定工作, 免受动态啁啾的影响。

4 结 论

本文利用传输矩阵法研究了形如 $(HL)^k A(LH)^k$ 的含 N 个耦合缺陷一维光子晶体的透射相位特性。结果表明, 对应每个缺陷模透射相位变化量为 π 且总变化量为 $N\pi$ 。当 $k=0$ 时, 透射相位曲线呈现近线性变化; 而当 $k \geq 1$ 时, 透射相位曲线在整个禁带范围内呈阶梯变化, 在每个缺陷模附近透射相位随频率迅速改变, 其相移量约等于 π ; 而且相邻缺陷模之间的透射率接近零, 这有利于减少高速调制时导致的动态啁啾对透射光信号的影响。根据透射相位的 π 相移特性, 引入非线性光学材料设计了快速响应的灵敏全光开关及逻辑门器件, 并讨论了其工作原理。

参考文献:

- [1] Song Bongshik, Yamada Shota, Asano Takashi, *et al.* Demonstration of two-dimensional photonic crystals based on silicon carbide [J]. *Opt. Expr.*, 2011, 19(12): 11084-11089.
- [2] Dong J W, Liang G Q, Chen Y H, *et al.* Robust absorption broadband in one-dimensional metallic-dielectric quasi-periodic structure [J]. *Opt. Expr.*, 2006, 14(5): 2014-2020.
- [3] Su An, Gao Yingjun. Transmission spectra of one-dimensional photonic crystal quantum well with double negative medium [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2010, 27(5): 596-601 (in Chinese).
- [4] Liang W Y, Dong J W, Wang H Z. Directional emitter and beam splitter based on self-collimation effect [J]. *Opt. Expr.*, 2007, 15(3): 1234-1239.
- [5] Liang W Y, Wang T B, *et al.* Super-broadband non-diffraction guiding modes in photonic crystals with elliptical rods [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, 43(7): 075103.
- [6] Chen Xianfeng, Wang Sake, Wang Guang, *et al.* Optimal design of optical diodes based on one-dimensional nonlinear photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2011, 28(5): 612-616 (in Chinese).
- [7] Qin Fei, Liu Ye, Li Zhiyuan. Optical switching in hybrid semiconductor nonlinear photonic crystal slabs with Kerr materials [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(3): 035209.

- [8] Miao Luping, Xu Xuming, Yang Chunyun, *et al.* Design of novel all-optical switching based on photonic-crystal heterostructure coupling waveguides [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2011, 28(3): 369-374 (in Chinese).
- [9] Chen Shuai, Wang Chunxia, Liu Hongwei, *et al.* Low power optical switch based on guided resonance of photonic crystal slab [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2011, 28(1): 73-81 (in Chinese).
- [10] Liu Ye, Qin Fei, Meng Ziming, *et al.* All-optical logic gates based on two-dimensional low-refractive-index nonlinear photonic crystal slabs [J]. *Opt. Expr.*, 2011, 19(3): 1945-1953.
- [11] Raineri F, Cojocaru C, Monnier P, *et al.* Ultrafast dynamics of the third-order nonlinear response in a two-dimensional InP-based photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(11): 1880-1882.
- [12] Villeneuve P R, Abrams D S, Fan S, *et al.* Single-mode waveguide microcavity for fast optical switching [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(24): 2017-2019.
- [13] Zou H, Liang G Q, Wang H Z. Enhancing all-optical switching by localizing the control and signal light fields in the same defect region [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, 24(9): 2141-2145.
- [14] Lan S, Nishikawa S, Wade O. Leveraging deep photonic band gaps in photonic crystal impurity bands [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(15): 2101-2103.
- [15] Yanik M F, Fan S, Soljacic M, *et al.* All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(24): 2506-2508.
- [16] Cuesta-Soto F, Martinez A, Blasco J, *et al.* Numerical analysis of the performance of Mach-Zehnder interferometric logic gates enhanced with coupled nonlinear ring-resonators [J]. *Opt. Expr.*, 2007, 15(5): 2323-2335.
- [17] Zou Hui, Liang Guanquan, Wang Hezhou. Efficient all-optical dual-channel switches, logic gates, half-adder, and half-subtractor in a one-dimensional photonic heterostructure [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, 25(3): 351-360.
- [18] Leng Fengchun, Liang Wenyao, Lin Bin, *et al.* Wideband slow light and dispersion control in oblique lattice photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Expr.*, 2010, 18(6): 5707-5712.
- [19] Winful H G. Nature of “superluminal” barrier tunneling [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(2): 023901.
- [20] Dai Q F, Li Y W, Wang H Z. Broadband two-dimensional photonic crystal wave plate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(6): 061121.
- [21] Wu K S, *et al.* Phase engineering of one-dimensional defective photonic crystal and applications [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, 91(1): 145-148.
- [22] Huang Qin, Leng Fengchun, Liang Wenyao, *et al.* Sensitive temperature sensor based on phase properties of photonic crystal [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2010, 59(6): 4014-4017 (in Chinese).
- [23] Born M, Wolf E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* [M]. 7th Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 49-59.
- [24] Aleksandrov A V, Avilov M S, Calabrese R, *et al.* Experimental study of the response time of GaAs as a photoemitter [J]. *Phys. Rev. E*, 1995, 51(2): 1449-1452.