

# 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计

陈鹤鸣<sup>1</sup> 王国栋<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 南京邮电大学光通信研究所, 江苏 南京 210003  
<sup>2</sup> 华信邮电咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘要** 提出了一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关。基质光子晶体通过在硅介质上构造三角形周期排列的空气孔形成,同时引入线缺陷和点缺陷,获得了一种具有高品质缺陷模的光子晶体点、线混合缺陷结构。在此基础上,通过点缺陷处填充克尔型非线性光学介质——有机聚合物含对甲苯磺酸取代基的聚二乙炔(PDA-PTS),调节控制光使缺陷模发生动态迁移,从而实现了对信号光的通断控制。采用时域有限差分法(FDTD)进行仿真计算。分析结果表明,开关消光比大,阈值低,响应时间快。该缺陷模迁移光子晶体全光开关对于未来高速全光通信和光计算技术的应用具有重要学术意义。

**关键词** 光电子学;光开关;光子晶体;PDA-PTS

**中图分类号** TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0323006

## Design of New Photonic Crystal All-Optical Switching Based on Dynamical Shift of Defect Mode

Chen Heming<sup>1</sup> Wang Guodong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optical Communications of Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Nanjing, Jiangsu 210003, China

<sup>2</sup> Huaxin Post-Telecom Consulting and Designing Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China

**Abstract** A new type of photonic crystal all-optical switching based on the dynamical shift of defect mode has been designed. This photonic crystal is triangular lattice with circular air holes in silicon, in which line defects and point defects are included. A photonic crystal structure introducing both point and line defects which has quality defect mode is designed. After that, point defects have been filled with the Kerr nonlinear optical material — polydiacetylene para-toluene sulfonate (PDA-PTS). With regulating the control light, the defect mode brings the dynamical shift, and accordingly it can be controled the signal light on and off. The two-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) calculation has been used to numerical demonstration. The results show that the switch has great extinction ratio, low threshold power density, and fast switching time. The photonic crystal all-optical switching based on the dynamical shift of defect mode has an important academic significance to the high-speed all-optical communications, as well as the optical computing technology in the future.

**Key words** optoelectronics; optical switch; photonic crystal; PDA-PTS

**OCIS codes** 230.3120; 250.6715; 130.5296

## 1 引言

随着人们对信息量需求的急剧增加,网络通信和信息计算面临着新的挑战,从而推动了光波技术的发展。以光子作为计算对象的光信息处理技术,其中包括光学图像处理、光学信息存储和光学计算

等的研究在不断深化,其中全光开关作为光信息处理的基本元件,已经成为当前光通信和光计算技术的关键性器件。由于光子晶体具有极强的控光能力,可以用它来制作以前所不能制作的高性能全光开关器件。对光子晶体光开关的研究将能进一步推

**收稿日期**: 2010-06-28; **收到修改稿日期**: 2010-10-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61077084)和南京邮电大学科研基金(NY207053)资助课题。

**作者简介**: 陈鹤鸣(1958—),男,教授,硕士生导师,主要从事光通信与光波技术等方面的研究。

E-mail: chhm@njupt.edu.cn(中国光学学会会员号: S042100005M)

动光子晶体产业在全光集成、光通信和光信息处理等方面的发展<sup>[1~7]</sup>。

本文在研究了光子晶体缺陷模迁移理论和对光子晶体点、线混合缺陷的大量仿真实验基础上,采用三阶非线性光学性能较好的有机聚合物——对甲苯磺酸取代基的聚二乙炔(PDA-PTS)——填充点缺陷处,以实现缺陷模动态位移,设计了一种新型结构的缺陷位移型光子晶体全光开关。分析结果表明,该全光开关的消光比大,阈值低,响应快。该全光开关对于未来高速全光通信和光计算技术的应用具有重要学术意义。

## 2 时域有限差分法基本原理

利用二维时域有限差分法(2D-FDTD)仿真计算光子晶体点、线混合缺陷的频率谱及全光开关性能。FDTD是把含时间变量的麦克斯韦旋度方程在Yee空间中转换为差分方程,在时间和空间上逐步推进求解,在网格的边界处可利用周期性的边界条件,最终得到整个空间的电磁分布,对于TM模,其2D-FDTD方程为

$$H_x \Big|_{i,j}^{n+1/2} = -H_x \Big|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t/\delta}{\mu_0} (E_z \Big|_{i,j}^n - E_z \Big|_{i,j-1}^n), \quad (1)$$

$$H_y \Big|_{i,j}^{n+1/2} = H_y \Big|_{i,j}^{n-1/2} + \frac{\Delta t/\delta}{\mu_0} (E_z \Big|_{i,j}^n - E_z \Big|_{i-1,j}^n), \quad (2)$$

$$E_z \Big|_{i,j}^{n+1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ri,j} - \sigma_{i,j} \Delta t/2}{\epsilon_0 \epsilon_{ri,j} + \sigma_{i,j} \Delta t/2} E_z \Big|_{i,j}^n + \frac{\Delta t/\delta}{\epsilon_0 \epsilon_{ri,j} + \sigma_{i,j} \Delta t/2} (H_y \Big|_{i,j}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1,j}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j}^{n+1/2} + H_x \Big|_{i,j-1}^{n+1/2}), \quad (3)$$

式中*i, j, n*为整数,分别为沿*x, y*方向上的空间步长和时间步长的个数。

考虑FDTD的稳定性条件,取: $\Delta s \leq 1/10\lambda_{\min}$ 和 $\Delta t \leq \Delta s/(\sqrt{3}v_{\max})$ ,其中 $\Delta s$ 为空间步长, $\lambda_{\min}$ 为网格空间内所考虑电磁波的最小波长, $\Delta t$ 为时间步长, $v_{\max}$ 为计算空间中电磁波的最大速度。

## 3 全光开关设计

### 3.1 光子晶体点、线混合缺陷选择

在二维光子晶体中引入线缺陷形成波导,引入点缺陷形成谐振腔。光子晶体波导和谐振腔的合理耦合能够获得性能优越的缺陷模,可制作各种性能优越的光子器件,如光调制器、光开关等。本文在大量仿真实验的基础上,列举3类点、线缺陷结合模模型,如图1所示。

上述点、线混合缺陷光子晶体采用 $12 \times 14$ 个元胞,晶格常数 $a = 650 \text{ nm}$ ,空气孔半径 $r = 0.45a$ ,四周设有完美匹配层(PML),取2D-FDTD的横向、纵向空间步长各为 $50 \text{ nm}$ ,即 $\Delta s = 50 \text{ nm}$ ,时间步长 $\Delta t$ 满足稳定性条件,取 $C \times \Delta t = 10 \text{ nm}$ , $C$ 为真空中的光速。在线缺陷入口处设置激光源,激光源为高斯冲激脉冲,在线缺陷出口处设置了监视器。通过反复的仿真实验,约 $2^{16}$ 时间步数场稳定下来, $2^{16}$ 为2的乘方,便于有效地进行快速傅里叶(FFT)计算。频谱图如图2所示。仿真结果表明,点缺陷位于两线缺陷中间的结构能够获得高品质的缺陷模,为制作性能优越的缺陷迁移光子晶体全光开关提供了条件。

### 3.2 全光开关结构

在点、线混合缺陷的研究基础上,本文设计了一种新型缺陷迁移光子晶体全光开关。如图3所示,光子晶体是通过在硅介质上构造三角形周期排列的空气孔形成,晶格常数 $a = 661 \text{ nm}$ ,空气孔直径 $d = 595 \text{ nm}$ ,高纯硅在C波段的折射率为3.4。

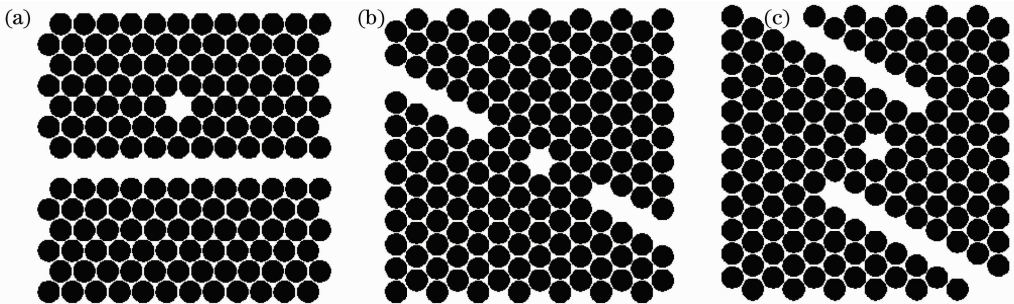


图1 点、线混合缺陷光子晶体结构。(a)点缺陷位于线缺陷一侧,(b)点缺陷和线缺陷位于直线上,(c)点缺陷位于两线缺陷中间

Fig. 1 Structure of photonic crystal introducing both point and line defects. (a) point defect lies to one side of line defects, (b) point defect and line defects are on the same straight line, (c) point defect is between two line defects

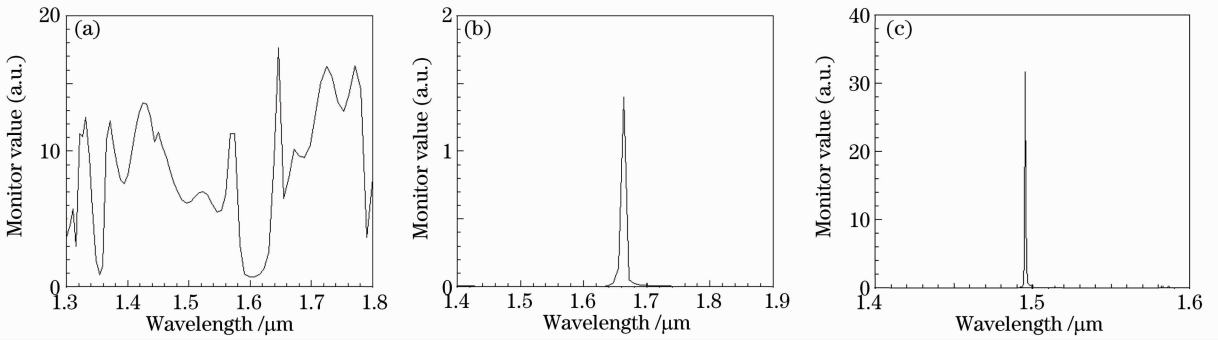


图2 点、线混合缺陷光子晶体频谱。(a)点缺陷位于线缺陷一侧,(b)点缺陷和线缺陷位于直线上,(c)点缺陷位于两线缺陷中间

Fig. 2 Frequency spectrum of photonic crystal introducing both point and line defects. (a) point defect lies to one side of line defects, (b) point defect and line defects are on the same straight line, (c) point defect is in between two line defects

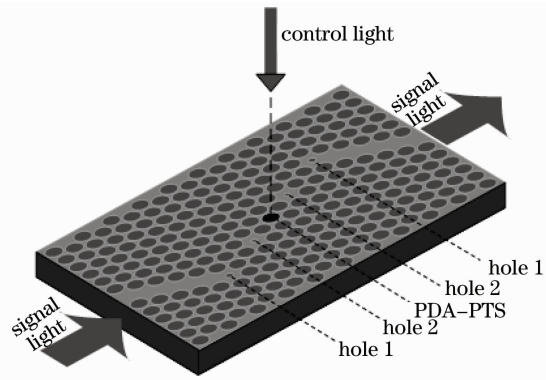


图3 缺陷位移光子晶体全光开关模型

Fig. 3 Model of photonic crystal all-optical switching based on the dynamical shift of defect mode

首先,在完整结构二维光子晶体中心空气孔处填充 PDA-PTS 材料<sup>[8-10]</sup>,构成点缺陷,PDA-PTS 的线性折射率为  $n = 1.88$ ,三阶非线性折射率为  $n_2 = 2.2 \times 10^{-12} \text{ (cm}^2/\text{W)}$ 。然后,在中心点缺陷的两侧以高纯硅填充空气孔的方式分别引入两条线缺陷,并保证点缺陷至两线缺陷的距离相等且两线缺陷之间保持平行。最后,通过减小空气孔大小引入四个点缺陷(小孔 1,小孔 2),小孔 1 位于两线缺陷的末端,半径为  $0.2a$ ,小孔 2 位于中央点缺陷与线缺陷之间,半径为  $0.15a$ 。该光子晶体平板厚度取  $500 \text{ nm}$ 。信号光垂直于空气孔方向,在光子晶体平板内从线缺陷一端输入,从另一端输出;控制光垂直于光子晶体平板,入射在中心点缺陷处。

### 3.3 开关机理

光开关实质是实现光路的断和通。根据缺陷模位移理论,缺陷处采用非线性光学材料后,可以调节控制光来改变非线性光学材料的折射率,从而使得缺陷模发生位移,此时原本处在缺陷位置的信号光则陷入光子晶体禁带内,无法透传,从而实现信号

光的通断控制,

在光开关设计过程中,引入 4 个点缺陷,成对称的两对,起到牵引光波传递的作用。小孔 1 和波导紧连一起,在输入前端小孔 1 通过谐振增强了它周围的光强,这样更有利于能量向中央非线性缺陷处传递,在输出后端小孔 1 谐振出来的光可以直接进入波导,大大地增强了输出光的强度。同时小孔 1 半径不能太小,否则光反被局域在了小孔 1 内部,不能传递出去。小孔 2 通过谐振,起连接波导和中央非线性共振腔的作用,使得能量传递效率更高,大大改善了开关的消光比。

同时在光开关底层增加一反射器。该反射器是由沿 YZ 方向周期性变化的完整结构二维光子晶体构成,使得控制光频率落在该光子晶体禁带内,实现对控制光的全反射。反射器的作用明显。1)可以作为平板光开关的衬底层,有利于实际中集成;2)实现控制光的全反射,控制光全反射后能够再次作用于中央非线性点缺陷,增强了克尔非线性效应,降低了控制光的光强;3)如果没有该反射器,控制光直接穿通开关,加强了周围环境的电磁辐射,同时光路集成时泄露的强光会对周边其他器件带来严重干扰。

## 4 数值计算与分析

### 4.1 全光开关的频率特性

为了得到全光开关的频率特性,信号光采用冲激脉冲。采用 FDTD 对本文设计的全光开关进行仿真计算,横向、纵向空间步长各为  $40 \text{ nm}$ ,时间步长  $\Delta t$  满足稳定性条件,取  $C \times \Delta t = 10 \text{ nm}$ , $C$  为真空中的光速。通过反复的仿真实验,约  $2^{20}$  时间步数后场稳定下来。

品质因子(Q)是表征谐振腔性能的重要参数。

品质因子  $Q$  定义为共振模的中心频率与共振模的半峰全宽(FWHM)的比值。 $Q$  值越高,限制光的能力越强。当无控制光作用时,输出端出现一波长为 1543 nm 缺陷模,此时  $Q$  值为 1580;当有控制光输入时,中心非线性材料的折射率因此发生变化,从而引起缺陷模产生一定的位移,移到了 1550 nm 处,与之前相比位移了 7 nm,此时  $Q$  值为 1550,如图 4 所示。

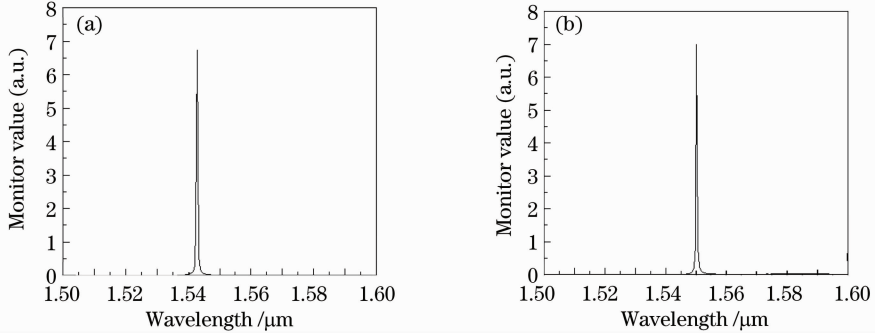


图 4 输出端频谱。(a)无控制光输入,(b)有控制光输入

Fig. 4 Frequency spectrum of output terminal. (a) no input control light, (b) with input control light

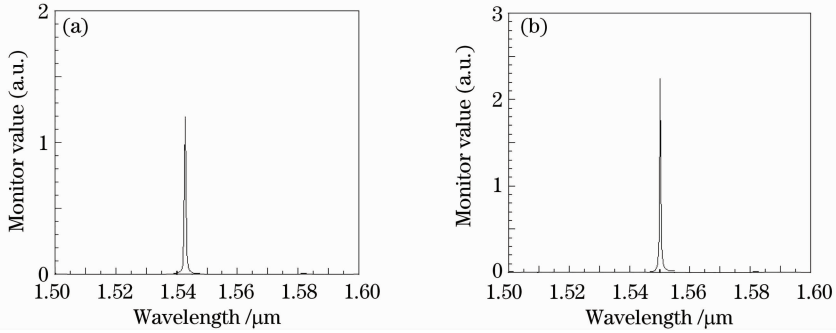


图 5 没有引入 4 个点缺陷时输出端频谱。(a)无控制光输入,(b)有控制光输入

Fig. 5 Frequency spectrum of output terminal when 4 point defects are not included. (a) no input control light,

(b) with input control light

无控制光作用下中央点缺陷处的三阶非线性光学材料 PDA-PTS 的线性折射率  $n_0$  为 1.88,在控制光作用下,通过实验仿真得到,当缺陷模位移到 1550 nm 时,非线性材料的折射率改变  $n$  为 1.902,相对于线性折射率改变了 0.022,PDA-PTS 的非线性折射率为  $n_2 = 2.2 \times 10^{-12} \text{ (cm}^2/\text{W)}$ ,根据光克尔效应  $n = n_0 + 2n_2(P/S)$ ,其中  $P$  为功率, $S$  是波导的平均截面积,代入计算可以得功率密度  $p$ :

$$p = (n - n_0) / 2n_2 = 5 \text{ GW/cm}^2. \quad (4)$$

本文采用 YAG 激光器发出的 1064 nm 的激光作为控制光,脉冲宽度 35 ps,重复频率为 10 Hz,阈值功率密度为 5 GW/cm<sup>2</sup>。

#### 4.2 全光开关功能实现及性能分析

将上述信号光由冲激脉冲改为波长为 1550 nm 的连续光,在此情况下分析光开关性能。当无控制光

其他参数不变,对没有引入 4 个点缺陷(小孔 1 和小孔 3)时的缺陷位移光子晶体全光开关进行仿真计算,得到此时的频谱图,如图 5 所示。在无控制光和有控制光输入情况下,分别获得缺陷模为 1543 nm 和 1550 nm, $Q$  值分别为 308 和 387。可以看出,引入小孔 1 和小孔 2 情况下,缺陷模的  $Q$  值具有明显的优势。

输入时,1550 nm 的连续信号光不能透过,根据全光开关的频率特性,此时系统的谐振频率落在 1543 nm 处,信号光不能和系统发生共振,开关处于断开状态。当有控制光输入时,缺陷模迁移到了 1550 nm 处,此时信号光则可以透过,光开关处于接通状态,如图 6 所示。

图 7 是用 FDTD 数值计算光开关断通状态下的透射率和时间响应图。

在断开状态时,开关透射率约为  $4 \times 10^{-4}$ ;接通状态时,开关透射率约为 0.95。这样可以计算得该开关的消光比为 34 dB,开关消光比性能较好。

FDTD 数值仿真约  $2^{20}$  步长数场稳定下来,时间步长  $\Delta t$  满足  $c \Delta t = 10 \text{ nm}$ ,其中  $c$  为真空中的光速,可以计算得

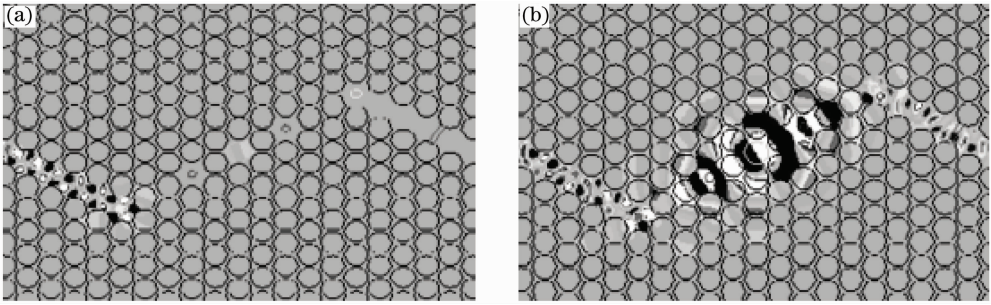


图 6 全光开关内部光强分布。(a)断开状态时,(b)接通状态时

Fig. 6 Steady field distribution of the all-optical switching. (a) light-off states, (b) light-on states

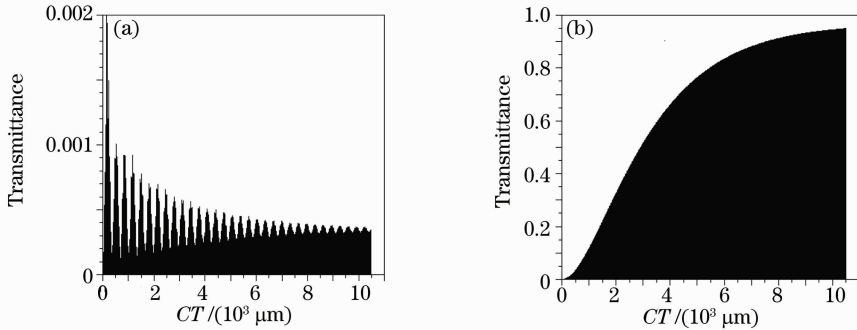


图 7 光开关强度大小和时间响应图。(a)无控制光输入;(b)有控制光输入

Fig. 7 Time-domain steady-response intensity of the optical switch. (a) no input control light, (b) with input control light

$$\Delta t = \frac{10 \text{ nm}}{3 \times 10^8 \text{ (m/s)}} \approx 3.3 \times 10^{-17} \text{ s}, \quad (5)$$

因此,系统稳定时间为

$$t = \Delta t \times n = 34.6 \text{ ps}. \quad (6)$$

该开关的系统响应稳定在皮秒量级,这是目前据我们所知大多数光开关所无法达到的<sup>[11,12]</sup>。

## 5 结 论

本文在对光子晶体点、线混合缺陷的大量仿真实验基础上,利用 PDA-PTS 晶体作为克尔型非线性介质,设计了一种新型缺陷位光子晶体全光开关。该全光开关的工作波长在 1550 nm,控制光采用 YAG 激光器发出的 1064 nm 的激光。采用 FDTD 对器件的开关行为仿真计算。分析结果表明,开关消光比达到 35 dB,响应时间为 34.6 ps,阈值功率密度为 5 GW/cm<sup>2</sup>。

## 参 考 文 献

1 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29** (10): 2914~2919  
王济洲,熊玉卿,王多书等.一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J].*光学学报*,2009,**29**(10):2914~2919

2 Liu Qineng. Defect mode and mode of electromagnetic wave in cylindrical doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 991~995  
刘启能.圆柱形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J].*中国激光*,2010,**37**(4):991~995  
3 Shi Jianping, Dong Kexiu, Huang Yuan *et al.*. Second harmonic generation and effect factors in silica photonic crystal waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 506~510  
石建平,董可秀,黄圆等.全硅光子晶体波导中二次谐波产生及影响因素[J].*光学学报*,2009,**29**(2):506~510  
4 S. Akihiko, Takasumi, K. Eiichi, N. Masaya. All-optical switch and digital light processing using photonic crystals [J]. *NTT Technical Review*, 2005, **3**(12): 120~123  
5 I. K. Hwang, M. K. Kim, Y. H. Lee. All-optical switching in InGaAsP-InP photonic crystal resonator coupled with microfiber [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(19): 235~237  
6 A. Mazurenko, R. Kerst, J. I. Dijkhuis *et al.*. Ultrafast optical switching in three dimensional photonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**: 213903  
7 N. Masaya, S. Akihiko, M. Satoshi *et al.*. Optical bistable switching action of Si high-Q photonic crystal nanocavities [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2678~2687  
8 S. Inoue, S. Yokoyama, Y. Aoyag. Direct determination of photonic band structure for wave-guiding modes in two-dimensional photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2461~2468  
9 Pu Hongting, Liu Ling. Advance in research and developments of third-order nonlinear optical polymers [J]. *Materials Review*, 2007, **21**(2): 65~69  
浦鸿汀,刘玲.有机三阶非线性光学材料的研究进展[J].*材料导报*,2007,**21**(2):65~69  
10 P. Tran. Photonic band structure calculation of material

- possessing Kerr nonlinearity [J]. *Phys. Rev.*, 1995, **12**(15): 10673~10676
- 11 Luo Zhaoming, Sun Junqiang, Liu Jing. All-optical switch based on two-dimensional nonlinear photonic crystal waveguide [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 683~685  
罗朝明, 孙军强, 刘 靖. 二维非线性光子晶体波导全光开关 [J]. *半导体光电*, 2006, **27**(6): 683~685
- 12 Tan Chunhua, Huang Xuguang. An all optical switch based on the tunable bandgap of a two dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2714~2718  
谭春华, 黄旭光. 基于带隙可调的二维光子晶体全光开关 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2714~2718