

基于二维非线性光子晶体的全光开关特性

杨 辉 王智勇 张 伟 王文超

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 为获得一个优化的全光开关结构,在光子晶体 90° 弯曲波导的基础上,进一步改进光子晶体结构,并在其中加入克尔(Kerr)型非线性介质柱,得到了非线性光子晶体全光开关结构。通过时域有限差分(FDTD)法数值分析表明,该开关结构能够实现的带宽大约为 50 nm,消光比大于 40 dB,阈值功率密度约为 $5.2 \text{ W}/\mu\text{m}$ 。同时,该结构还可以实现基本的逻辑功能。

关键词 光学器件;光子晶体;光开关;非线性;光控制光

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1016003

Properties of All-Optical Switch Based on Two-Dimensional Nonlinear Photonic Crystals

Yang Hui Wang Zhiyong Zhang Wei Wang Wenchao

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract To obtain an optimum structure of all-optical switch, based on 90° photonic-crystal bend waveguide, an improved photonic crystal structure with Kerr nonlinear dielectric rods is introduced. By means of finite difference time domain (FDTD), the numerical analysis shows that this switch can achieve the following performance: bandwidth (about 50 nm), high extinction ratio ($>40 \text{ dB}$), threshold power density ($5.2 \text{ W}/\mu\text{m}$). At the same time, it can also implement fundamental logical functions.

Key words optical devices; photonic crystals; optical switch; nonlinearity; light controls light

OCIS codes 160.5298; 060.6718; 160.4330

1 引 言

全光开关是一种重要的集成光子学器件,完全利用光子与介质的相互作用来实现有效的“开”、“关”控制作用^[1~4]。全光开关在集成光子学,超高速信息处理和光通信等方面有重要价值。另一方面,光子晶体作为一种折射率周期性分布的人工微结构材料,如果光波的频率在光子晶体的禁带范围内,则它不能在介质中传播。当在光子晶体中引入线缺陷后,形成光子晶体波导,原来无法在光子晶体中传播的光波就可以沿着线缺陷传播。光子晶体波导具有传统波导所不具有的一些独特的性质,如光

子晶体波导的尺寸可以做到很小,这有利于光子晶体波导器件的集成;调整光子晶体波导两侧的结构参数可以实现慢光,有利于制作光缓存和光延迟线等器件^[5,6];光子晶体波导的拐弯角度可以很大,这使得光子晶体波导的形状可以更加多样化,并且其中的光波可以基本无损耗地传播^[7~10]。利用光子晶体波导实现全光开关的方法,最早是由 Scalora 等^[11]在 1994 年提出。近年来,对在光子晶体中加入非线性物质实现全光开关的研究也日趋增多^[2,12~16]。但主要集中在光子晶体定向耦合开关和光子晶体微腔光开关^[1,2,16,17]。

收稿日期: 2012-03-16; **收到修改稿日期**: 2012-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(60925019,61090393)和中央高校新兴学科与创新研究基金(ZY GX2010X013)资助课题。

作者简介: 杨 辉(1986—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: yanghui_job@163.com

导师简介: 王智勇(1969—),男,博士,副教授,主要从事量子光学与光子晶体等方面的研究。

E-mail: zywang@uestc.edu.cn

本文利用光波几乎可以无损耗地通过 90° 弯曲的光子晶体波导这一特性,通过引入克尔(Kerr)型非线性介质柱的办法,设计了波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的三端口光子晶体光控光开关结构,并且利用软件 MEEP 模拟了该结构的开关行为。数值计算结果表明该开关结构不仅具有较低的阈值和较高的消光比,而且还可以实现基本的逻辑功能。

2 全光开关的设计

2.1 全光开关的结构考虑

根据光子晶体波导的特性和全光开关原理,设计了如下光控光的开关结构,如图 1 所示。

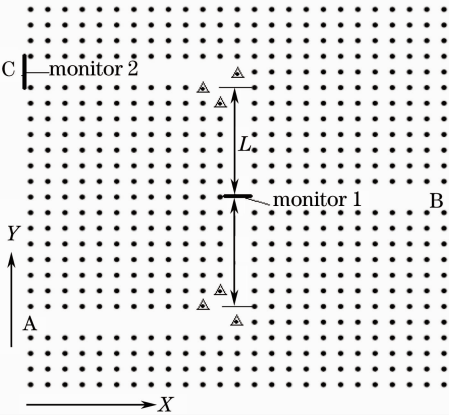


图 1 非线性光子晶体光开关结构示意图

Fig. 1 Schematic of optical switching based on nonlinear photonic crystals

该结构由一个“T”型波导和两个 90° 弯曲波导组成,其中“ Δ ”所标注的地方为克尔型非线性介质柱,A 和 B 为输入端,C 为输出端。具体参数:晶格常数 $a=0.5286 \mu\text{m}$,背景介质空气介电常数为 ϵ_0 , $L=7a$,线性和非线性圆形介质柱半径 $r=0.18a$,由于是二维(2D)结构,所以它们在与介质柱平行方向(即 Z 方向)长度均为无穷大。线性介质柱相对介电常数为 $\epsilon=11.56$,克尔型非线性材料的线性部分的相对介电常数为 $\epsilon_L=7$,克尔系数为 $n_2=1.5 \times$

$10^{-5} \mu\text{m}^2/\text{W}$,计算网格取 25×25 个格点。

2.2 全光开关的实现原理

图 1 中“ Δ ”所标注的是克尔型非线性介质柱,其中该非线性物质的折射率 n 与电场强度 E 关系如下

$$n = n_L + n_2 |E|^2, \quad (1)$$

式中 n_L 为线性物质的线性部分对应的折射率。由(1)式知,一定强度的光作用于非线性物质时,可以使该物质的折射率发生变化。通常情况下克尔系数 n_2 的值很小,当光强较小时,按照线性情况处理即可;然而当光强较大时,就不能够再忽略非线性效应引起的变化。对于如图 1 所示的 90° 弯曲的光子晶体波导,如果未引入克尔型非线性介质柱,当入射光的频率在光子晶体禁带范围内,光波几乎可以无损耗地通过。引入克尔型非线性介质柱之后,当从 A 或者 B 端入射的光强较小时,非线性物质的折射率低于附近介质柱的折射率,导致入射光的频率小于或等于波导在该段处的截止频率,此时光不能通过弯曲波导;当从 A 或者 B 端入射的光强较大时,非线性物质的折射率接近或大于附近介质柱的折射率,导致入射光的频率大于波导在该段处的截止频率,光就可以通过弯曲波导。因此,可以通过调整从 A 或者 B 端入射光束的光强,来实现光控制光的全光开关功能。

2.3 存在克尔型非线性材料时的时域有限差分(FDTD)理论

在 Z 方向上,介电常数不随空间位置的变化而变化,因此可以转化为 2D 问题来处理。FDTD 是把含有时间变量的麦克斯韦(Maxwell)旋度方程在 Yee 空间转化为差分方程,在时间和空间上逐步推进求解,在网格边界处利用周期性边界条件,得到整个空间的电磁场分布情况^[18]。本文以 TM 波为例,在光子晶体波导中引入克尔型非线性材料,此时二维 FDTD 算法的离散表达式,可以由 Yee 差分网络推导出,Maxwell 差分方程表达为

$$H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) = H_x^{n-1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta y} [E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)], \quad (2)$$

$$H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) = H_y^{n-1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} [E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)], \quad (3)$$

$$D_z^{n+1}(i, j) = E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[H_y^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) - H_y^{n+1/2} \left(i - \frac{1}{2}, j \right) \right] - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) - H_x^{n+1/2} \left(i, j - \frac{1}{2} \right) \right]. \quad (4)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ 为矩形网络在 x, y 方向的空间步长, Δt 为时间步长, i, j 和 n 分别表示 x, y 方向上空间步长和时间步长的个数。通过以上离散形式进行迭代依然不可以求解, 还需要建 D_z^{n+1} 和 E_z^{n+1} 之间的关系。对于克尔型非线性材料, 根据文献[19]可得到如下关系:

$$E_z^{n+1}(i, j) = \frac{D_z^{n+1}(i, j)}{\epsilon_0 [\epsilon_L + \chi^{(3)} |E_z^{n+1}(i, j)|^2]}, \quad (5)$$

式中 $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性极化率。结合(2)~(5)式就可以求出克尔非线性材料的完全 FDTD 解。

3 FDTD 数值计算与仿真

3.1 光开关结构的 FDTD 数值计算

上述结构所对应完美正方晶格的光子带隙的归一化频率范围为: $\omega = 0.302 \times 2\pi c/a$ 至 $\omega = 0.443 \times 2\pi c/a$ [15], 因此利用 TM 模式, 频率范围为 $(0.302 \sim 0.443)2\pi c/a$ 的高斯脉冲, 从 A 端输入, C 端输出。通过 FDTD 数值计算来获得线性与非线性两种不同状况下的传输特点, 如图 2 所示。实线所对应的是软件 MEEP 中光源的幅度为 0.01 时的传输情况, 在这种条件下可按照线性条件来处理; 虚线对应的是幅度为 1000 时的传输情况, 其对应的是非线性条件下的状况。在线性条件下, 频率 $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$, 对应的波长为 1550 nm 处, 具有最高的消光比, 高于 40 dB。与非线性情况相比, $\omega = (0.33 \sim$

$0.35) \times 2\pi c/a$ 在线性时禁止传播的。因此当光从 A 端或 B 端单独输入时, 只要场强满足一定条件就可以表现出一定的开关效应。

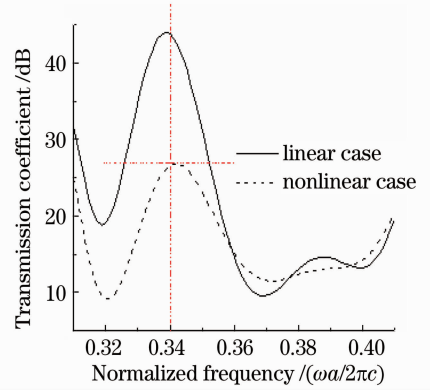


图 2 含有克尔型非线性介质柱的弯曲波导频率传输情况

Fig. 2 Transmitted frequencies through the bend waveguide comprising Kerr-type nonlinear dielectric rods

3.2 开关效应的仿真分析

经过多次计算分析, 在软件 MEEP 中取光源的幅度为 450, 记为 Q_0 。先将频率为确定 $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$, 幅度为 Q_0 的单频信号单独从 A 端输入, 然后将频率为 $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$, 幅度为 Q_0 的单频信号单独从 B 端输入, 最后将这两种信号分别同时从 A, B 端输入, 它们的场图分布如图 3(a)~(c)所示。

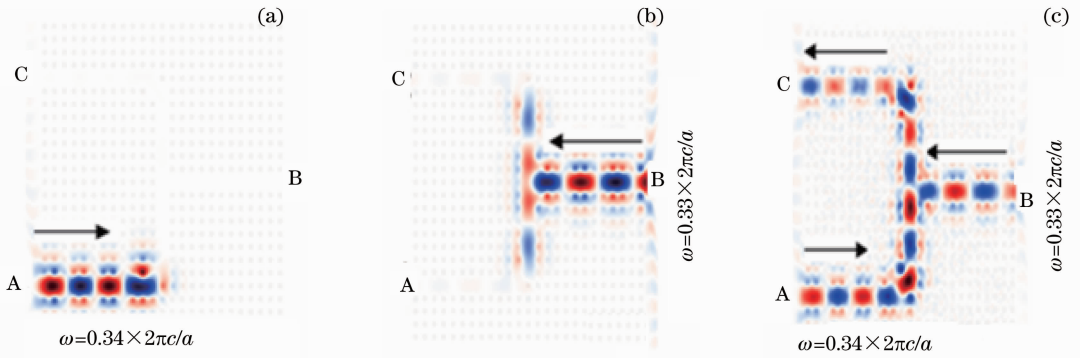


图 3 (a)单频信号从 A 端入射; (b)单频信号从 B 端入射; (c)单频信号从 A、B 端同时入射

Fig. 3 (a) Single-frequency signal injected into port A; (b) single-frequency signal injected into port B; (c) single-frequency signals injected into ports A and B at the same time

作为分析结果的图 3 很直观地说明了光控光开关的效应: 当两束单频信号光单独入射时, C 端没有光的输出, 此时开关处于“关”态, 当两束单频信号光同时从各自对应的端口入射时, C 端有光输出, 此时开关处于“开”态。

分析结果还表明, 本结构不仅可以实现不同频率的光从不同端口入射时, 相互之间可以控制, 而且

当这两束不同频率的光同时从 A 端或 B 端输入时, 也可以实现光控光的行为, 如图 4(a)和(b)所示。

以上分析了不同频率的光从不同端口和相同端口入射时光控光的开关行为。同时, 进一步的仿真结果表明, 相同频率的光之间在该结构中也可以很好地实现光控光的运行, 如图 5(a)和(b)所示。

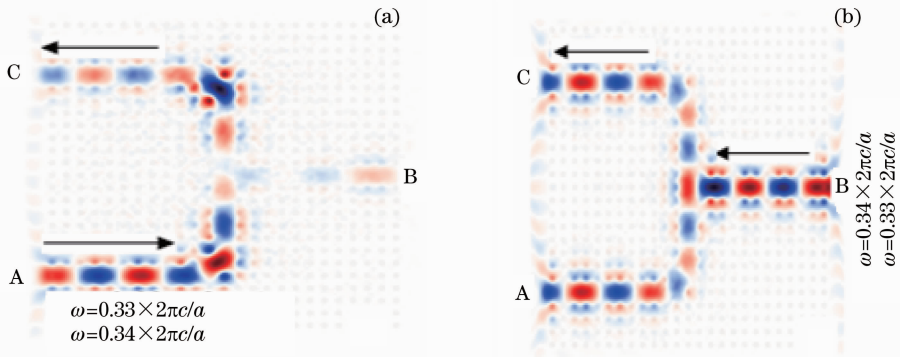


图 4 (a)单频信号同时从 A 端输入;(b)单频信号同时从 B 端输入

Fig. 4 (a) Single-frequency signals injected into port A at the same time; (b) single-frequency signals injected into port B at the same time

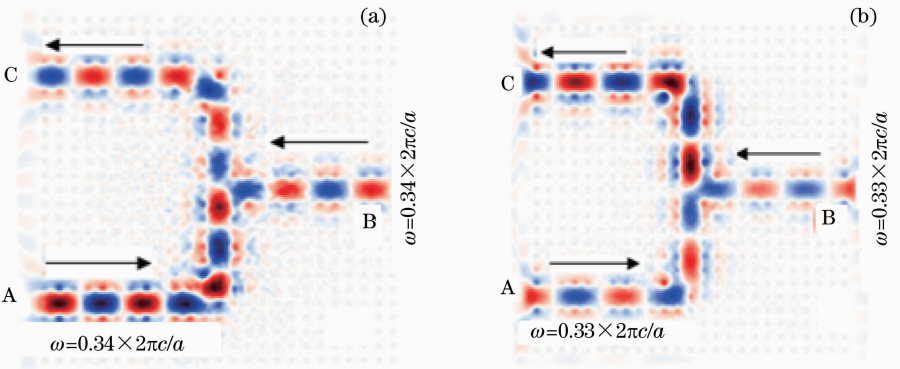


图 5 相同频率的信号同时从 A、B 端输入。(a) $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$; (b) $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$

Fig. 5 Same-frequency signals injected into ports A and B at the same time. (a) $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$; (b) $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$

现在来定量分析相同频率入射条件下光控光开关的行为特征。取入射到两个端口光源幅度的初始值均为 $0.1Q_0$ ，首先以公差 $0.1Q_0$ 递增，直至 Q_0 。分别研究当光从 A、B 端单独入射和从 A、B 端同时入射时，C 端的出射的情况。A、B 端入射光的幅度

分别记为 Q_A 和 Q_B 。在这些条件下，对于频率 $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$ 的入射光，分析得到的传输特性如图 6 所示。而对于频率 $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$ 的入射光，其传输特性如图 7 所示。

上面的仿真计算过程中，只是确定了使传输状况

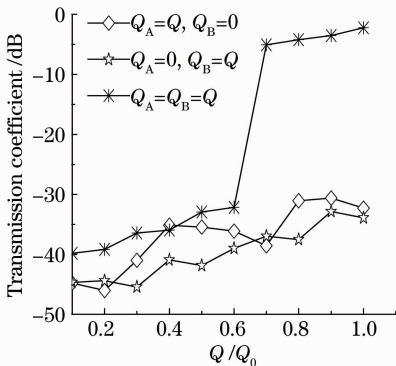


图 6 频率为 $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$ 的光从不同端口入射时的传输情况

Fig. 6 Transmission condition when light with frequency $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$ injecting into different ports

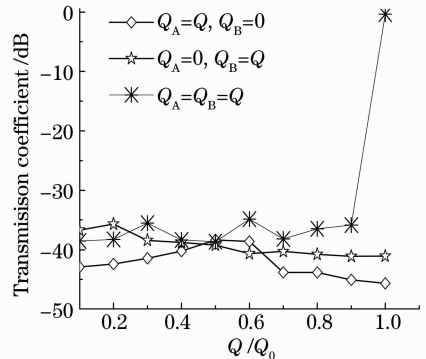


图 7 频率为 $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$ 的光从不同端口入射时的传输情况

Fig. 7 Transmission condition when light with frequency $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$ injecting into different ports

发生突变的阈值的大致范围,分别为 $(0.6 \sim 0.7)Q_0$ 和 $(0.9 \sim 1.0)Q_0$ 。在这两个范围内,通过将公差值缩小为 $0.01Q_0$,进一步地计算结果表明更为精确的阈值分别为 $0.61Q_0$ 和 $0.98Q_0$ 。

以步长 $\omega = 0.01 \times 2\pi c/a$ 为间隔,改变入射光的频率,重复以上仿真过程,可以得到实现光控光运行的频率范围在 $\omega = 0.33 \times 2\pi c/a$ 至 $\omega = 0.34 \times$

$2\pi c/a$ 之间。

同时,还研究了单频信号 $\omega = 0.34 \times 2\pi c/a$ 单独从A端输入时,C端的输出的情况。定性的分析结果发现,在 Q_A 从 $0.1Q_0$ 增加到 Q_0 的过程中存在两个阈值,分别记为 Q_{AF} (First)和 Q_{AS} (Second)。到达这两个阈值前后的场分布情况如图8(a)~(c)所示。

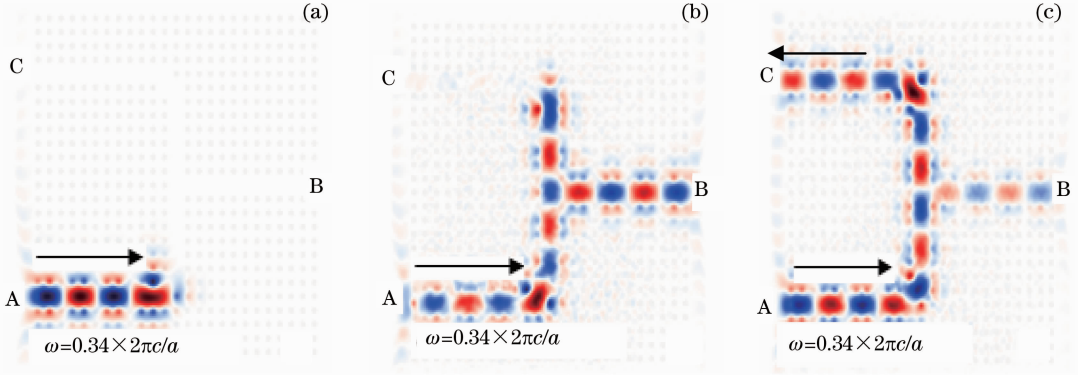


图8 频率为 $\omega=0.34 \times 2\pi c/a$ 的单频信号在不同幅度下的场的分布情况。(a) $Q_A < Q_{AF}$; (b) $Q_{AF} < Q_A < Q_{AS}$; (c) $Q_A > Q_{AS}$

Fig. 8 Field distributions of signals with single frequency $\omega=0.34 \times 2\pi c/a$ in different amplitudes. (a) $Q_A < Q_{AF}$; (b) $Q_{AF} < Q_A < Q_{AS}$; (c) $Q_A > Q_{AS}$

进一步地,还对这种情况进行了定量的分析,在点 $(a, 0, 0)$ 和 $(-11a, 0, 0)$ 处放置探测器(Monitor

1,2),宽度均为 $2a$,位置在图1标出。其传输特性曲线如图9所示。上述计算结果表明 Q_{AF} 和 Q_{AS} 的值分别为 $0.57Q_0$ 和 $0.76Q_0$ 。

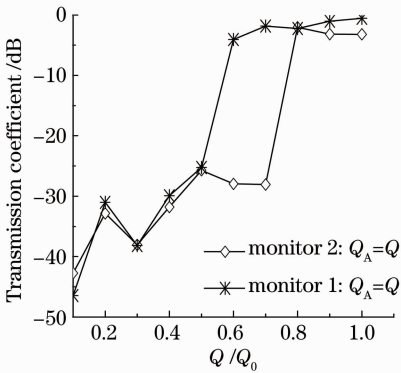


图9 频率为 $\omega=0.34 \times 2\pi c/a$ 的光从端口A入射时的传输情况

Fig. 9 Transmission condition when light with frequency $\omega=0.34 \times 2\pi c/a$ injecting into port A

4 全光开关的逻辑功能分析

下面简要说明前面所设计光开关可以实现的逻辑“与”功能。当光从A和B端输入时,光功率大于阈值功率时对应1,小于阈值功率时对应0;当光从C端输出时,有输出对应1,没有输出对应0。

当入射光从A端或B端输入时,当 $0 \leq Q_B, Q_A < 0.61Q_0$ 时(即输入光均小于阈值功率),C端无输出;当 $0 \leq Q_B < 0.61Q_0$ 且 $Q_A \geq 0.61Q_0$,或者 $0 \leq Q_A < 0.61Q_0$ 且 $Q_B \geq 0.61Q_0$ 时,C端无输出;当 $Q_B, Q_A \geq 0.61Q_0$ 时,C端有输出。因此,这相当于C对A和B取逻辑“与” $C = A \cap B; 0 \cap 0 = 0, 1 \cap 0 = 0 \cap 1 = 0, 1 \cap 1 = 1$ 。如表1所示。

表1 光从A端或B端输入时可以实现的逻辑功能

Table 1 Realizable logical function when light injecting into port A or B

Q_A, Q_B	$0 < Q_B < 0.61Q_0, 0 < Q_A < 0.61Q_0$	$Q_A \geq 0.61Q_0$ and $0 \leq Q_B < 0.61Q_0$	$Q_B \geq 0.61Q_0$ and $0 \leq Q_A < 0.61Q_0$	$Q_B, Q_A \geq 0.61Q_0$
Input A	0	1	0	1
Input B	0	0	1	1
Output C = A ∩ B	0	0	0	1

5 结 论

在光子晶体的 90° 弯曲波导的基础上, 通过在 其中加入克尔型非线性介质柱的办法, 得到了非线性光子晶体全光开关结构。数值仿真结果表明, 该开关在相同频率或不同频率的光控光条件下, 带宽约为 50 nm; 有较低的阈值 $0.57Q_0$; 大于 40 dB 的消光比。考虑到软件 MEEP 中设置的各个参数, 阈值功率密度的对应的实际值大约为 $5.2 \text{ W}/\mu\text{m}$ 。进一步的研究表明该结构也可以实现逻辑“与”功能和分束器的功能, 此外还表现出了双稳态效应, 这些还有待进一步的研究。该光开关结构为利用光控光的形式实现全光开关提出了一种新的途径。

参 考 文 献

- 1 T. Tanabe, M. Notomi, S. Mitsugi *et al.*. All-optical switches on a silicon chip realized using photonic crystal nanocavities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(15): 151112
- 2 X Hu, Q. Gong, Y. Liu *et al.*. All-optical switching of defect mode in two-dimensional nonlinear organic photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(23): 231111
- 3 Z. H. Zhu, W. M. Ye, J. R. Ji *et al.*. High-contrast light-by-light switching and AND gate based on nonlinear photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(5): 1783~1788
- 4 Y. Liu, F. Qin, F. Zhou *et al.*. Ultrafast and low-power photonic crystal all-optical switching with resonant cavities[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(8): 083102
- 5 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao *et al.*. Investigation on a novel photonic crystal structure with dispersion-free slow light based on line-defect of quadrate air holes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1006006
张 伟, 王智勇, 王文超 等. 基于方形孔线缺陷的新型光子晶体零色散慢光结构研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1006006
- 6 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao *et al.*. Investigation on wideband slow light based on photonic-crystal coupled waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0213001
张 伟, 王智勇, 王文超 等. 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0213001
- 7 M. Povinelli, S. Johnson, S. Fan *et al.*. Emulation of two-dimensional photonic crystal defect modes in a photonic crystal with a three-dimensional photonic band gap[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **64**(7): 075313
- 8 S. F. Mingaleev, Y. S. Kivshar. Nonlinear transmission and light localization in photonic-crystal waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(9): 2241~2249
- 9 A Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 10 Li Zhiyuan, Gan Lin. Two-dimensional silicon photonic crystal slab devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900119
李志远, 霖 甘. 二维硅基平板光子晶体器件[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900119
- 11 M. Scalora, J. P. Bowling, C. M. Bowden *et al.*. Optical limiting and switching of ultrashort pulses in nonlinear photonic band gap materials [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(10): 1368~1371
- 12 F. Cuesta-Soto, B. Martínez A García-Baños. Numerical analysis of all-optical switching based on a 2-D nonlinear photonic crystal directional coupler[J]. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, 2004, **10**(5): 1101~1106
- 13 D. Vujic, S. John. Pulse reshaping in photonic crystal waveguides and microcavities with Kerr nonlinearity: critical issues for all-optical switching[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **72**(1): 013807
- 14 M. W. McCutcheon, G. W. Rieger, J. F. Young *et al.*. All-optical conditional logic with a nonlinear photonic crystal nanocavity[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(22): 221102
- 15 F. Qin, Y. Liu, Z.-M. Meng *et al.*. Design of Kerr-effect sensitive microcavity in nonlinear photonic crystal slabs for all-optical switching[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(5): 053108
- 16 T. Tanabe, K. Nishiguchi, A. Shinya *et al.*. Fast all-optical switching using ion-implanted silicon photonic crystal nanocavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(3): 031115
- 17 M. Fatih, S. Fan, M. Soljačić M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(14): 2739
- 18 Chen Heming, Wang Guodong. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323006
陈鹤鸣, 王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323006
- 19 P. Tran. Photonic-band-structure calculation of material possessing Kerr nonlinearity[J]. *Phys. Rev. B*, 1995, **52**(15): 10673~10676

栏目编辑: 韩 峰