

# 光子晶体异质结构耦合波导光开关

黎磊<sup>1,2</sup> 刘桂强<sup>1,2</sup> 陈元浩<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)  
(<sup>2</sup> 江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要** 以二维三角晶格光子晶体为研究对象,在该光子晶体中引入两行平行的单模线缺陷波导,以一行耦合介质柱为间距,通过调节部分耦合介质柱的折射率,构筑了光子晶体异质结构耦合波导光开关结构。利用平面波展开法和定向耦合原理计算了在不同入射光频率下,缺陷波导间耦合介质柱的折射率不同时的耦合长度,确定了合适的光子晶体异质结构耦合波导光开关的结构参数。利用时域有限差分法研究了该光开关中耦合介质柱的折射率变化及异质结构介质柱的位置分布对光信号输出路径的影响。结果表明,通过改变该结构中耦合介质柱的折射率可以改变光的输出路径,可实现光的开关行为。并且异质结构介质柱位置的随机分布对该光开关的影响不大,有助于光子晶体新型滤波器、定向耦合器、波分复用器以及光开关等光子器件的研究。

**关键词** 光学器件;光子晶体;异质结;耦合波导;光开关

**中图分类号** O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0123002

## An Optical Switch Based on Coupled Heterostructure Photonic-Crystal Waveguides

Li Lei<sup>1,2</sup> Liu Guiqiang<sup>1,2</sup> Chen Yuanhao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University,  
Nanchang, Jiangxi 330022, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronic and Telecommunication of Jiangxi, Nanchang, Jiangxi 330022, China

**Abstract** A photonic crystal coupling structure is designed by introducing two parallel single-mode defect waveguides with the spacing of one row coupling rods in the two-dimensional (2D) triangular lattice array. By modulating the refractive index of some coupling rods, an optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides is constructed. The coupling lengths for different refractive indices of coupling rods at different frequencies are calculated to determine optimal structural parameters for the switch by the plane-wave expansion method and the principle of directional coupling. The effect of variations in the refractive index of the coupling rods and the position effect of the heterostructure coupled waveguides on the signal output channel are analyzed by using finite different time domain method. The simulation results show that it is an effective way to realize the switch function by appropriately tuning the refractive index of some coupling rods. The influence of the random distribution of the heterostructure on the switch is modest, which may contribute to the research over new kinds of optical filters, directional couplers, wavelength division multiplexers, optical switches and other photonic devices.

**Key words** optical devices; photonic crystal; heterostructure; coupled waveguides; optical switch

**OCIS codes** 130.4815; 130.5296; 160.5298; 230.5298; 250.6715

**收稿日期**: 2012-07-20; **收到修改稿日期**: 2012-08-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(11004088, 11264017)、江西省自然科学基金(2010GQW0025)、江西省科技攻关项目(20112BBE50033)和江西省教育厅科技项目(GJJ10099)资助课题。

**作者简介**: 黎磊(1988—),男,硕士研究生,主要从事光电技术及光子晶体等方面的研究。

E-mail: fanrenlilei@126.com

**导师简介**: 刘桂强(1977—),女,副教授,硕士生导师,主要从事光电技术及光子晶体等方面的研究。

E-mail: liougq@yahoo.com.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040111786s)

## 1 引 言

光子晶体是一种由不同折射率的介电材料周期排列而成的新型微结构材料<sup>[1,2]</sup>,由于周期性排列的介电材料的多重布拉格散射,导致光子在其中传播出现类似于半导体中电子的某些行为,处于特定频率范围的光不能在光子晶体中传播,即所谓的光子禁带。而在完整的光子晶体中连续除去一些介质柱,形成线缺陷,此时,原来在完整光子禁带中的光可以沿着线缺陷传播,能量局域在缺陷中,形成光子晶体波导。不同于常规的介质波导,光子晶体波导是依靠光子带隙实现的,其优点是在大的拐角处可实现低损耗甚至零损耗传输。这一优点使得光子晶体波导更加容易集成,所以在制作光子器件方面具有广泛的应用前景,如设计和制备基于光子晶体的滤波器<sup>[3,4]</sup>、波分复用器<sup>[5~8]</sup>、定向耦合器<sup>[9,10]</sup>、光纤以及光开关<sup>[11~14]</sup>等。

利用光子晶体缺陷模迁移理论,采用往点缺陷中填充具有克尔非线性光学效应的有机聚合物等方法,通过调节外加控制光的强弱,使缺陷模发生动态迁移,可实现对信号光的通断控制<sup>[11,12]</sup>。异质结构光子晶体拥有普通结构的光子晶体所不具有的新颖物理特性<sup>[15~19]</sup>,如更宽的光子带隙,近年来已引起越来越多的重视。但基于光子晶体异质结构耦合波导的研究目前还较少。光子晶体不同耦合区域的耦合波导拥有不同的耦合状态,通过适当的结构设计可以使其很好地实现光信号的转移传输,扩展了光开关的功能,使得其在光子晶体光开关以及其他光子器件中发挥更好的应用潜力。最近,人们开始设计基于二维正方格子光子晶体异质结构耦合波导结构,通过调节耦合介质柱的折射率,并采用 $45^\circ$ 或 $90^\circ$ 的出射角来实现光信号的开关作用<sup>[13,14]</sup>。三角晶格光子晶体在滤波、定向耦合以及波分复用等方面同

样具有广泛的应用前景,但国内外还未见关于利用二维三角晶格光子晶体异质结构波导来实现光开关功能的研究。

在二维三角晶格光子晶体异质结构中引入了两行以一行耦合介质柱为间距的线缺陷波导,通过研究两线缺陷波导之间的耦合作用,计算了不同折射率的耦合介质柱下的耦合长度,以选取合适的耦合区折射率柱子、设置相应的耦合区长度来建构一个光子晶体光开关模型,再通过时域有限差分法(FDTD)模拟验证光开关的功能以及在此基础上分析异质结构的位置分布对光开关的影响。结果表明在二维三角晶格光子晶体耦合波导中引入异质结构,可以很好地改变光信号的输出路径,实现光开关的功能。另外,耦合效应是由耦合区域的整体性决定,异质结构介质柱的位置分布对该光开关的影响不大,这为光子晶体耦合波导光开关的制备带来了很大的灵活性。结合缪路平等<sup>[13,14]</sup>关于正方晶格光子晶体耦合波导光开关的研究结果可知,异质结构位置的分布对光开关功能的微影响具有普适性,即无论在正方晶格光子晶体还是三角晶格光子晶体,异质结构位置的随机分布对光开关功能的影响都不大。总之,该结构设计不仅体积小,能量转移效率高,而且制备灵活度大,研究结果有助于新型滤波器、定向耦合器和波分复用器等其他耦合光子器件的应用发展。

## 2 结构设计及耦合原理分析

以三角晶格排列的二维光子晶体作为研究对象,设计了由光子晶体异质结构组成的耦合波导光开关结构。如图1所示,该耦合结构通过移去两行介质柱得到两个相邻耦合波导,两相邻波导间的一行介质柱称之为耦合介质柱,整个耦合区由a和b两

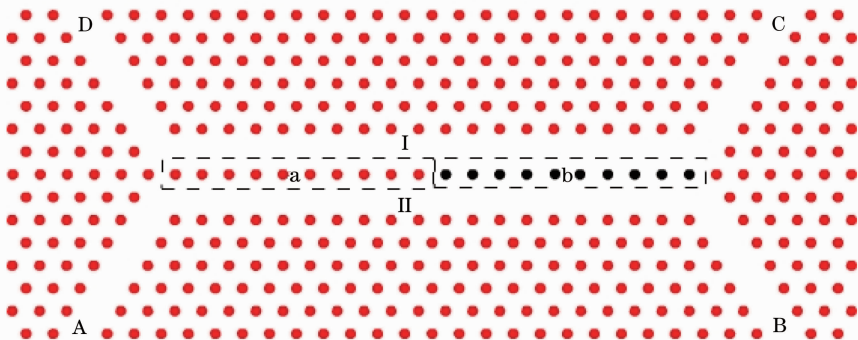


图1 设计的光子晶体光开关的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the photonic crystal optical switch

个区域组成,两耦合区域的长度分别为  $L_a$  和  $L_b$ , 对应的耦合长度分别为  $l_a$  和  $l_b$ 。该三角晶格阵列的晶格常数为  $a$  ( $a=620$  nm), 组成三角晶格阵列的介质柱无限长, 半径为  $r$ ,  $r=0.2a$ , 耦合介质柱的折射率分别为  $n_a, n_b$ , 光波从入射端口 A 或 D 入射, 通过调节节点介质柱的折射率、入射光的频率以及波导耦合区的长度等来控制两相邻波导之间的能量耦合行为, 使得光从端口 B 或 C 射出, 从而实现光开关的功能。

为了掌握该结构波导中电磁场能量的分布情况, 利用平面波展开法(PWM)分别对该结构的横电模(电场方向平行于介质柱的轴向方向)和横磁模(磁场方向平行于介质柱的轴向方向)的能带结构进行了数值计算。通过计算可知, 当介质柱子的折射率为 3.4 且结构不含缺陷时, 该结构的横磁模具有很宽的光子带隙, 范围为  $0.275\sim 0.45$ [如图 2(a)所

示]; 而横电模在该频率范围不存在光子带隙。引入线缺陷后, 在光子带隙中出现了缺陷态, 用超胞法计算出禁带中的缺陷模式, 图 2(b) 给出了  $n_a=n_b=3.4$  时横磁模的色散关系曲线图, 右下角的插图为所选取超胞的示意图。其中图 2 中纵坐标 ( $\omega a/2\pi c = a/\lambda$ ) 为归一化频率,  $\omega$  为光的角频率,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为光波长,  $k$  为波数。由图 2 可知, 线缺陷波导中的模式发生了分裂, 分裂成耦合系统中的两个本征模, 一个是对称模(偶模), 一个反对称模(奇模)。

图 3 是奇模和偶模在  $\Gamma$  点的空间能量分布情况。由图 3 可知, 奇模的模场相对于对称中心(耦合区介质柱)呈反对称分布, 而偶模则呈对称分布。当光波在其中一个线缺陷波导中传输时, 可以将其分解为耦合系统中奇模和偶模的线性叠加, 如果经过一段距离的传播后, 当两本征模的相位差达到  $\pi$  的奇数倍时, 光波就会转移到另外一个线缺陷波导中。

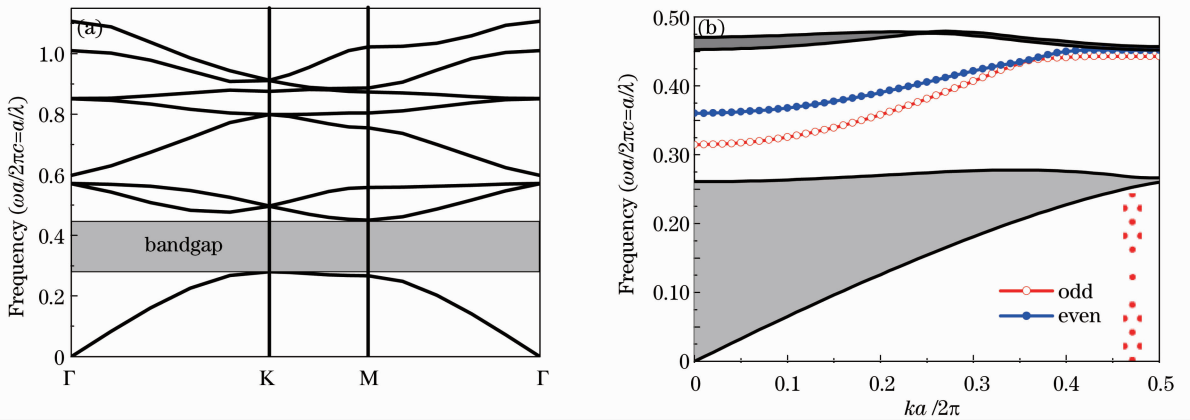


图 2 (a) 无缺陷时的能带图; (b) 有缺陷时的色散图

Fig. 2 (a) Band structure without defect; (b) dispersion curves with defect

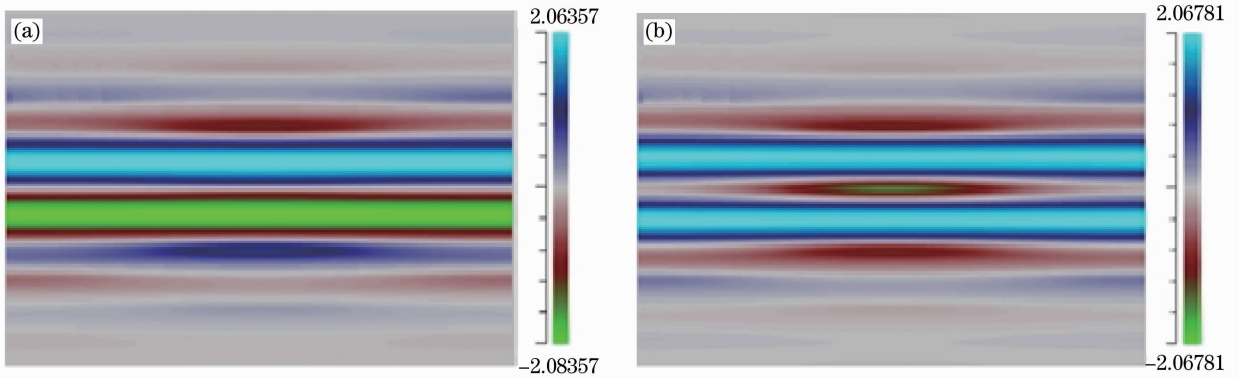


图 3 缺陷模在  $\Gamma(k=0)$  点的模场空间分布图。(a) 奇模; (b) 偶模

Fig. 3 Mode-field spatial distributions for the defect mode at the Gamma point. (a) Odd mode; (b) even mode

若耦合区 a 和 b 有相同的折射率, 即  $n_a=n_b$ , 则有  $l_a=l_b$ 。假设光波从输入端 A 输入。当耦合区总长度  $L_a+L_b$  为  $l_a(l_b)$  的奇数倍时, 光波从输出端 C 输

出, 形成交叉态, 当耦合区总长度为  $l_a(l_b)$  的偶数倍时, 光波从输出端 B 输出, 形成直通态, 光信号就这样在两个耦合波导中交替传输。随着传播常数的增大,

两个本征模先发生简并(图 2 中两缺陷模的交点,即解耦点),然后再解简并。对应简并点处频率的光入射时,光波会沿着原来的波导传播,不会发生转移。

为使设计的耦合波导结构具有光开关的功能,耦合区 a 和 b 的一些参数必须满足

$$L_a = il_a, \quad L_b = jl_b, \quad (1)$$

式中  $i = mj$  或  $j = ni$ ,  $i, j, m, n$  都是自然数,并且  $i$  和  $j$  要有不同的奇偶性。

根据耦合理论计算当耦合波导中耦合介质柱的折射率不同时,光波从一个波导传输到另一个波导所需的耦合长度。假设偶模的传播常数记为  $\beta_e$ , 奇模的传播常数记为  $\beta_o$ , 则耦合长度  $l_c$  可以由传播常数表示

$$l_c = \pi / |\beta_o - \beta_e|. \quad (2)$$

图 4 为当折射率( $n_a = n_b = n$ )取不同的值时,得到的归一化频率与耦合长度之间的关系曲线。由图 4 可知,对于固定的折射率,归一化频率越大,耦合长度也越大;归一化频率一定时,折射率越大,耦合长度也随着增大。因此,可以固定某一归一化频率,通过调节介质柱的折射率(晶体硅的热光效应或液晶的电光效应),得到不同的耦合长度,从而实现光开关的功能。由图 4 可知,当选取的入射波的归一化频率为 0.4, 两种介电柱的折射率为 3.4 和 2.8 时,对应的耦合长度分别为  $10a$  和  $5a$ 。且当  $l_a = 10a, l_b = 5a$  时,有  $l_a = L_a, 2l_b = L_b$ , 此时  $i = 1, j = 2$ ; 当  $l_a = 5a, l_b = 10a$  时,有  $2l_a = L_a, l_b = L_b$ , 此时  $i = 2, j = 1$ , 两者都满足要求。

### 3 数值模拟

以完全匹配层(PML)作为理想的吸收边界,通

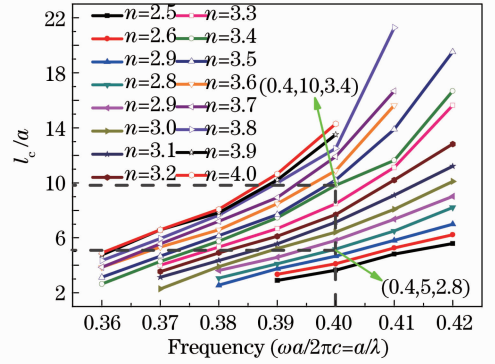


图 4 耦合区介电柱子取不同折射率时耦合长度与归一化频率的关系图

过时域有限差分法(FDTD)模拟了光波在该结构中的传播情况。波长为 1550 nm 的高斯连续光波从入射端口 A 输入,为了保证结果的精确度,模拟计算时网格划分尺寸  $\Delta x$  为  $a/16$ ;为了满足 FDTD 算法的收敛性要求,时间步长  $\Delta t$  取  $\Delta x/(2c)$ ;为了达到稳定态,模拟仿真时长为  $2^{15} \Delta t$ 。

为了研究耦合介质柱的折射率变化对耦合波导光开关性能的影响,模拟计算了耦合区 a 和 b 由相同折射率的介质柱组成的波导耦合结构的场分布情况,结果如图 5 所示。当两耦合区的耦合介质柱的折射率相等时,即  $n_a = n_b = 3.4$  时,光波经过耦合区域时的耦合长度为  $10a$ [如图 5(a)所示],当  $n_a = n_b = 2.8$  时耦合长度为  $5a$ [如图 5(b)所示],这两种情况下,由于耦合区长度都是耦合长度的偶数倍(分别为 2 倍和 4 倍),使得光波在波导 I 和波导 II 之间交替的传输,最后都从输出端 B 输出。

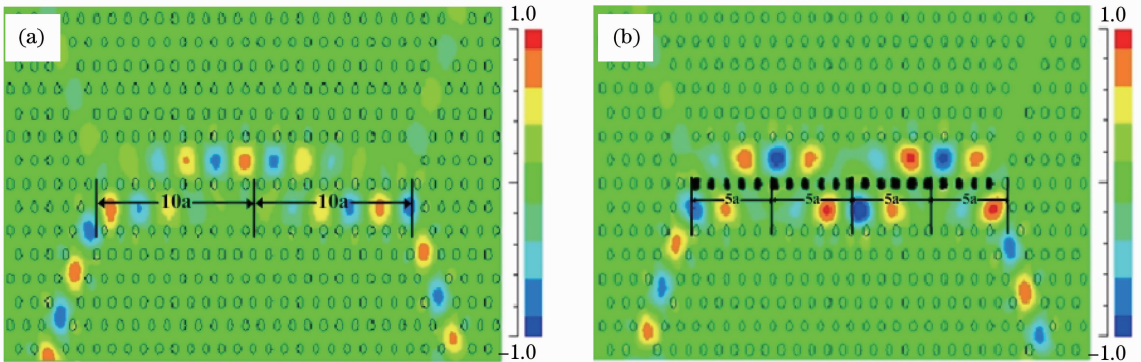


图 5 耦合区 a 和 b 是相同折射率的耦合柱子时耦合波导的场分布图。(a)  $n_a = n_b = 3.4$ ; (b)  $n_a = n_b = 2.8$

Fig. 5 Field distributions of coupled waveguides with the same refractive index of rods in coupling region a and b. (a)  $n_a = n_b = 3.4$ ; (b)  $n_a = n_b = 2.8$



为了进一步研究耦合介质柱的折射率变化对耦合波导光开关性能的影响,计算了耦合区 a 和 b 由不同折射率的介质柱组成的波导耦合结构的场分布情况。当  $n_a=3.4, n_b=2.8$  时,耦合区 a 的耦合长度为  $10a$ , 而耦合区 b 的耦合长度变为  $5a$  [如图 6(a)所示]; 而当  $n_a=2.8, n_b=3.4$  时,耦合区 a

的耦合长度变为  $5a$ , 而耦合区 b 的耦合长度变为  $10a$  [如图 6(b)所示], 光信号最后都从输出端口 C 输出。由此可知, 可以通过调节耦合区 a 或 b 中介质柱的折射率, 使得光信号从一个输出端转移到另一个输出端, 从而实现光开关的功能。

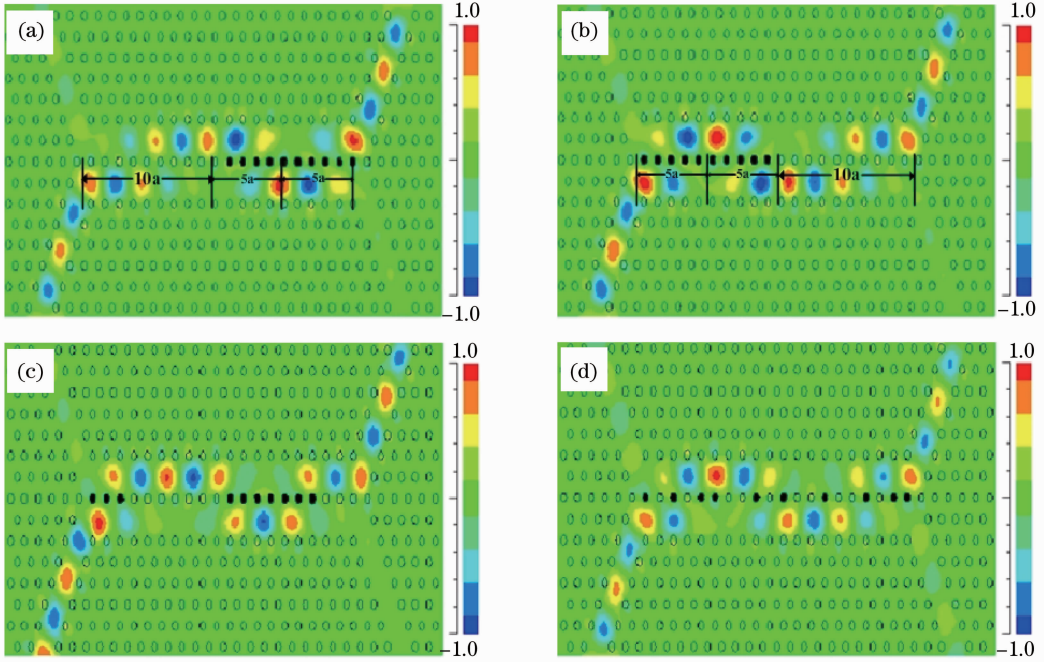


图 6 耦合柱子处于不同位置时光子晶体异质结构波导的场分布图。(a)  $n_a=3.4, n_b=2.8$ ;  
(b)  $n_a=2.8, n_b=3.4$ ; (c) 轻微失序; (d) 随机分布

Fig. 6 Field distributions of heterostructure photonic crystal waveguides when the rods of coupling regions a and b are located at different positions. (a)  $n_a=3.4, n_b=2.8$ ; (b)  $n_a=2.8, n_b=3.4$ ; (c) less disorder; (d) random distribution

为了研究耦合区不同折射率的介质柱的位置分布对光输出状态的影响,保持两种不同折射率的耦合柱子的数量不变,将两种折射率的介质柱位置进行部分移动和整体打乱。图 6(c)、(d) 分别给出的是两种折射率柱子轻微失序和随机分布的场分布图,从图 6(c)、(d) 可知,光信号在波导 I 和波导 II 之间经过耦合后,最终仍从输出端口 C 输出。可见,异质结构的介质柱不论是整体有序还是分散无序,对光开关的最终输出状态影响不大,这说明该波导结构中的耦合效应不是由单个介质柱所决定,而是由耦合区域的折射率的整体性决定,这为制作光子晶体耦合波导光开关带来了很大的灵活性。

为了研究该光开关的传输效率,以图 5(b)、图 6(b)和图 6(d)为例,计算了耦合区只有一种耦合介质柱 [如图 5(b)所示] 以及不同折射率的两种耦

合介质柱整体有序 [如图 6(b)所示] 以及杂乱无序 [如图 6(d)所示] 分布在耦合波导中时各个输出端口的透射率。当以波长为  $1550 \text{ nm}$  的光波从端口 A 入射到  $n_a=n_b=2.8$  的光开关时,输出端口 B 的出射率高达  $94\%$ , 小部分的能量损耗到了通道 D, 而输出端口 C 的出射率几乎为  $0$  [如图 7(a)所示]; 当光波入射到  $n_a=2.8, n_b=3.4$  的异质结有序分布下的光开关时,输出端口 C 的出射率也高达  $91\%$ , 小部分的能量损耗到了通道 D, 而输出端口 B 的出射率几乎为  $0$  [如图 7(b)所示]; 当同样波长的光波入射到异质结杂乱无序分布下的光开关时,输出端口 C 的透射率为  $74\%$ , 有少数能量损耗到了通道 D 及转移到了输出通道 B [如图 7(c)所示]。由此可见,利用二维三角晶格光子晶体异质结构耦合波导可以实现高传输效率的光开关功能。

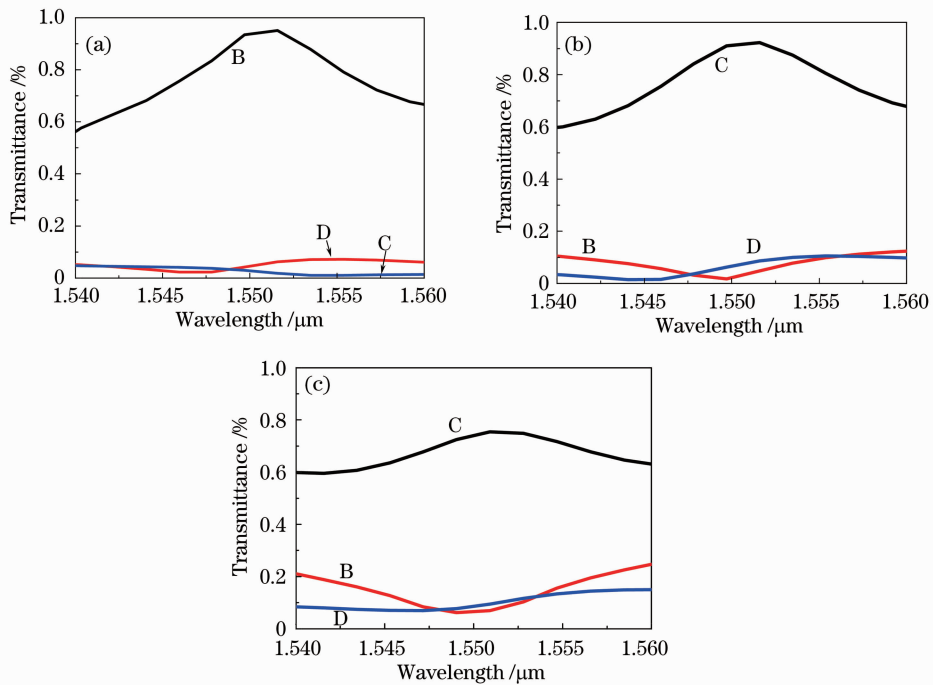


图 7 不同的光开关的各个输出通道的透射率曲线。(a) Fig. 5(b); (b) Fig. 6(b); (c) Fig. 6(d)

Fig. 7 Normalized transmission spectra for different output channels in different optical switches. (a) Fig. 5(b); (b) Fig. 6(b); (c) Fig. 6(d)

## 4 结 论

设计了基于二维三角晶格阵列的波导耦合光开关结构,通过 PWM 法和定向耦合原理计算了在不同入射光频率下,缺陷波导间耦合介质柱的折射率不同时的耦合长度,并利用 FDTD 对具有不同折射率的耦合介质柱光子晶体耦合波导光开关中光的传输行为进行了分析和研究。结果表明,光子晶体波导耦合遵循普通介质波导耦合的一般规律,也有定向耦合的功能,通过调节耦合区介质柱的折射率,形成异质结构,可以改变光信号的输出路径,实现光开关的功能。另外,异质结构介质柱的位置分布对该光开关的影响不大,这有助于基于光子晶体的新型滤波器、定向耦合器和波分复用器等其他耦合光器件的研究。

## 参 考 文 献

- 1 W. H. Guo, M. Wang, W. Xia *et al.*. Evaporation-induced self-assembly of capillary cylindrical colloidal crystal in a face-centered cubic structure with controllable thickness[J]. *J. Mater. Res.*, 2012, **27**(13): 1663~1671
- 2 Liu Guiqiang, Liao Yubo, Liu Zhongmin. Fabrication and transmittance spectra of high quality three-dimensional photonic crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- 刘桂强, 廖昱博, 刘忠民. 高质量三维光子晶体的制备及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2400~2403
- 3 D. Mao, Z. Ouyang, J. C. Wang *et al.*. A photonic-crystal polarizer integrated with the functions of narrow bandpass and narrow transmission-angle filtering [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(1): 127~131
- 4 J. Zimmerman, M. Kamp, A. Forchel *et al.*. Photonic crystal waveguide directional couplers as wavelength selective optical filters[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(4-6): 387~392
- 5 Yang Chunyun, Xu Xuming, Yu Tianbao. Wavelength division multiplexing research of photonic crystal waveguide coupling[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2010, **16**(1): 48~51
- 杨春云, 徐旭明, 于天宝. 光子晶体波导耦合的波分复用研究[J]. *量子光学学报*, 2010, **16**(1): 48~51
- 6 A. Ghaffari, M. Djavid, F. Monifi *et al.*. Photonic crystal power splitter and wavelength multi/demultiplexer based on directional coupling[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(7): 075203
- 7 Gao Yongfeng, Zhou Ming, Zhou Jun *et al.*. Design of power splitter by directional coupling between photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505003
- 高永锋, 周明, 周骏等. 光子晶体波导定向耦合功分器的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505003
- 8 T. B. Yu, M. H. Wang, X. Q. Jiang *et al.*. Ultracompact and wideband power splitter based on triple photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2007, **9**(1): 37~42
- 9 E. P. Kosmidou, E. E. Kriezis, T. D. Tsiboukis. Analysis of tunable photonic crystal directional couplers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(4): 043118
- 10 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1237~1240
- 朱志宏, 叶卫民, 袁晓东等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1237~1240

- 11 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
- 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
- 13 Miao Luping, Xu Xuming, Yang Chunyun *et al.*. Design of novel all-optical switching based on photonic-crystal heterostructure coupling waveguides[J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2011, **28**(3): 369~374  
缪路平, 徐旭明, 杨春云等. 一种新型基于光子晶体异质结构耦合波导的全光开关的设计[J]. *量子电子学报*, 2011, **28**(3): 369~374
- 14 Qiong Wang, Yiping Cui, Jiayu Zhang *et al.*. The position independence of heterostructure coupled waveguides in photonic-crystal switch[J]. *Optik*, 2010, **121**(8): 684~688
- 15 H. Kurt, D. S. Citrin. Photonic-crystal heterostructure waveguides[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(1): 78~84
- 16 B. S. Song, T. Asano, S. Noda. Heterostructures in two-dimensional photonic crystal slabs and their application to nanocavities[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2007, **40**(9): 2629~2634
- 17 Yan Hongwei, Zhang Lin, Zhu Fanghua *et al.*. Fabrication and properties of silica photonic crystal heterostructures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3592~3596  
严泓维, 张 林, 朱方华等. 二氧化硅光子晶体异质结构的制备与性质研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3592~3596
- 18 Li Wang, Zhanshan Wang, Yonggang Wu *et al.*. Enlargement of the nontransmission frequency range of multiple-channeled filters by the use of heterostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(2): 424~426
- 19 Liu Jiangtao, Zhou Yunsong, Wang Fuhe *et al.*. Guide modes in magnetic photonic crystal heterostructures composed of different lattices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 665~669  
刘江涛, 周云松, 王福合等. 不同晶格磁性光子晶体异质结构的界面传导模[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 665~669

栏目编辑: 王晓琰