

文章编号: 1000-7032(2013)03-0375-07

跑道型结构光子晶体波导定向耦合器

崔乃迪¹, 寇婕婷², 梁静秋³, 王维彪³, 郭进^{1*}, 冯俊波¹, 滕婕¹

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088;

2. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽合肥 230031;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033)

摘要: 鉴于波导定向耦合器在集成光路以及光电集成方面的广泛应用, 提出了一种基于光子晶体波导间高效耦合的光子晶体定向耦合器。通过主波导和耦合波导间的耦合, 可以实现对波长为 1 490 nm 和 1 550 nm 电磁波的高效分光。在将器件长度控制在 30 μm 左右的同时, 其总效率高达 93.05%。另外, 发现主波导和耦合波导间介质柱结构参数对电磁波的耦合周期有着极大的影响。并通过将介质柱沿 z 方向拉伸 0.1 a (a 为晶格周期), 设计了工作波长为 1 530 nm 和 1 540 nm 的光子晶体定向耦合器, 器件长度仅为 60 μm 。通过拉伸介质柱的纵向长度, 可以大幅减小耦合周期, 这对缩小器件体积以及实现更为密集的波分复用有着重要的意义。

关键词: 光子晶体; 定向耦合; 波分复用

中图分类号: 0436

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20133403.0375

The Directional Coupler on The Basis of The Runway Type Photonic Crystal Waveguide

CUI Nai-di¹, KOU Jie-ting², LIANG Jing-qiu³,

WANG Wei-biao³, GUO Jin^{1*}, FENG Jun-bo¹, TENG Jie¹

(1. Chinese Electronics Technology Group Corporation No. 38 Research Institute, Hefei 230088, China;

2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding Author, E-mail: phenixgj@hotmail.com

Abstract: Considering the significant value of the directional coupler on the integrated optical circuit and optical electronic integrated circuits, two dimensional photonic crystal directional coupler depended on the photonic crystal waveguide was designed. Via the coupling between the bus waveguide and the coupling waveguide, the high efficiency beam splitter of the electromagnetic wave with the wavelength of 1 490 nm and 1 550 nm was realized. The transmission efficiency reached about 93.5%, and the length of the device can be controlled under 30 μm . In addition, it was found that the coupling period was sensitive to the structure parameters of the rods located between the bus waveguide and the coupling waveguide. By stretching the length of the rods to about 0.1 a (a is the lattice period) along z direction, the directional coupler with the working wavelength of 1 490 nm and 1 550 nm was designed. The length of the device was about 60 μm , which was much shorter than that without optimizing. The coupling period can be dramatically shorten by stretching the

收稿日期: 2012-12-24; 修订日期: 2013-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(60877031)资助项目

作者简介: 崔乃迪(1983-), 男, 博士, 黑龙江佳木斯人, 主要从事微纳光学器件以及光电集成方面的研究。

E-mail: cuinaidi@163.com

longitudinal length of the rods, which is of crucial value on the decreasing the volume of the device and the achievement of the denser wavelength division multiplexing.

Key words: photonic crystal; directional coupler; wavelength division multiplex

1 引 言

光子晶体又被称为光半导体,是由具有不同介电常数的物质在空间周期性排列形成的人工微结构^[1-2]。光子晶体具备光子禁带,具有控制光在其内传播的特性,是实现未来大规模光电集成以及全光网络的重要潜在结构。通过在完整的二维光子晶体中引入缺陷,破坏光子禁带从而引入缺陷态,可用来制作二维光子晶体功能器件。在二维光子晶体中引入点缺陷即可得到光子晶体谐振腔^[3-5]。光子晶体谐振腔具有很高的态密度和品质因子,且比传统的谐振腔体积更小。若引入线缺陷即去掉数排介质柱,那么相应频率的电磁波就只能在线缺陷内传播,离开线缺陷就会迅速衰减,可以通过在二维光子晶体中引入线缺陷来制作光子晶体波导^[6-8]。近年来,基于光子晶体材料的光电功能器件得到了广泛的关注,利用光子晶体波导和光子晶体谐振腔作为基础器件单元,光子晶体波分复用器^[9-11]、耦合器^[12-13]、滤波器^[14-17]等光子晶体光电器件已经成为该领域的研究热点。在光波导光路中,两个相邻的波导间可能产生耦合,并能够将光耦合到相邻波导中。我们将光从一个波导完全耦合到另一个波导过程中经过的耦合长度称为耦合周期,不同频率电磁波的耦合周期不同,这就为利用波导间耦合实现不同频率电磁波的分光提供了可能。波导定向耦合器被广泛应用于光开关^[18-19]、波分复用^[20-21]和光分束器^[22-23]等器件中,在光信号处理、光通信、集成光路以及光子计算等领域有着举足轻重作用^[18-24]。而传统的基于光波导的定向耦合器由于耦合周期比较长,故体积大、集成度低。例如,基于光波导的定向耦合器通常需要数百微米甚至更长的长度^[25-26],而基于光子晶体波导的定向耦合器可以将耦合长度控制在数十个微米甚至更短,具有体积小、结构紧凑、易于大规模光电集成等优点。

本文提出了一种基于二维正方晶格结构的光

子晶体波导定向耦合器,由主波导和耦合波导两部分构成。研究发现,主波导和耦合波导间介质柱的结构参数对定向耦合器的性能有着较大的影响,通过优化介质柱的结构参数可以大幅减小耦合周期,从而进一步减小器件体积。相对于基于光波导的定向耦合器,本文设计的基于光子晶体波导的耦合器件具有更小的体积、更紧凑的结构以及更高的传输效率。

2 光子晶体定向耦合器的设计

在 SOI(Silicon on insulator) 上以正方晶格硅柱阵列光子晶体结构为基础,设计定向耦合器的结构。其中 SOI 顶硅层厚为 220 nm,下方二氧化硅埋层厚为 3 μm。硅材料折射率为 3.4,刻蚀硅柱高为 220 nm 以形成二维平板光子晶体结构,从而限制光在垂直于器件平面上的泄露损耗。光子晶体结构填充率为 $f=0.4$ 。这里定义填充率 $f=D/a$,其中 D 为硅柱直径 a 为晶格周期。利用平面波展开法,计算得其具有归一化频率 0.29 ~ 0.42 的 TM 波禁带,如图 1 所示。

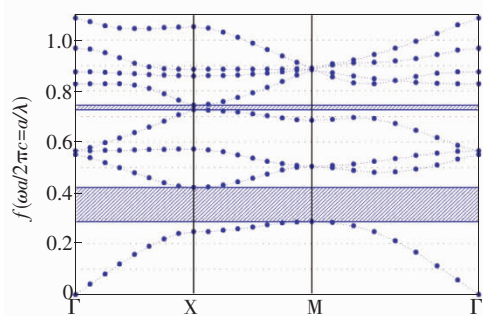


图 1 TM 波光子禁带

Fig. 1 The TM photonic band

定向耦合器的主要原理是相邻两波导间的电磁波耦合,而耦合系数与两波导间的距离相关。这里我们在两波导间仅保留一排硅柱结构,以提高波导间的耦合系数。图 2(a) 所示为当主波导和耦合波导间仅保留一排介质柱时该结构的色散曲线,其中曲线标注的区域为模式区,电磁波可以在模式区内传播;空白区域为光子禁带,在光子禁

带中的电磁波被禁止传播。另外,空气的色散曲线也在图中予以标出。在空气色散曲线上部光子导带的有效折射率小于空气的有效折射率,不满足全内反射条件,会造成垂直基片平面的损耗,无法高效传播。本文设计的光子晶体定向耦合器在光子禁带内部(归一化频率 0.29 ~ 0.42) 存在一奇一偶两个模式。图 2(b) 给出了该结构色散曲线的局部放大图。本定向耦合器的设计目标波长

为 1 490 nm 和 1 550 nm。当归一化波数 $k = 0.3$ 时,该结构光子晶体定向耦合器的两个模式对应的归一化频率分别为 0.387 和 0.402,此时若选择光子晶体晶格周期为 600 nm,则其对应的波导模式波长分别为 1 490 nm 和 1 550 nm,达到本文实现对这两束电磁波分光的目的。其中图 2(b) 插图应用平面波展开法计算该结构禁带特性所采用的超元胞范围。

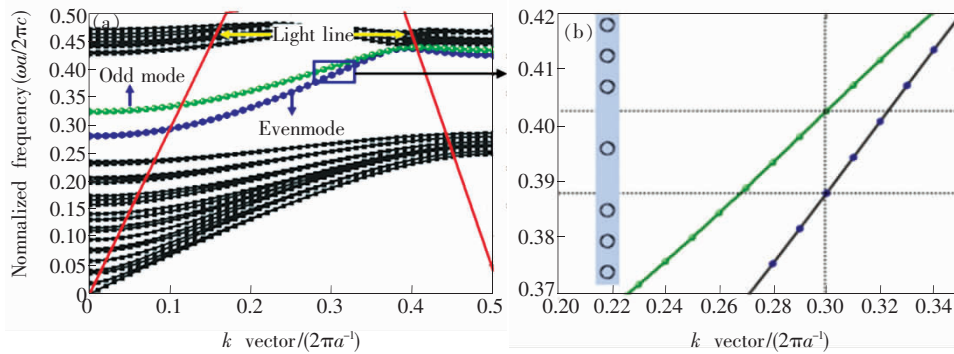


图 2 耦合结构的模式特性。(a) 耦合结构的色散曲线; (b) 色散曲线的局部放大图,其中插图为超元胞的选取范围。
Fig. 2 The mode characteristics of the coupling structure. (a) The dispersion curve of the coupling structure. (b) The partial enlarged detail of the dispersion curve, the inset is the boundary of the super-cell.

电磁波可以在定向耦合器的主波导和耦合波导间实现耦合,不同波长电磁波在定向耦合器中的耦合周期不同,可以通过调节定向耦合器的长度,从而实现不同波长电磁波从不同波导出射的目的。图 3(a) 和(b) 所示分别为波长 1 550 nm 和 1 490 nm 的电磁波在该结构定向耦合器中的场分布,可见电磁波的耦合周期与其波长成反比。

在图中阴影区位置,两种波长的电磁波场分布分别在耦合波导及主波导中有最大值。如果在阴影区位置通过改变波导走向将两束电磁波分开,则可以实现对两束电磁波分光的目的。

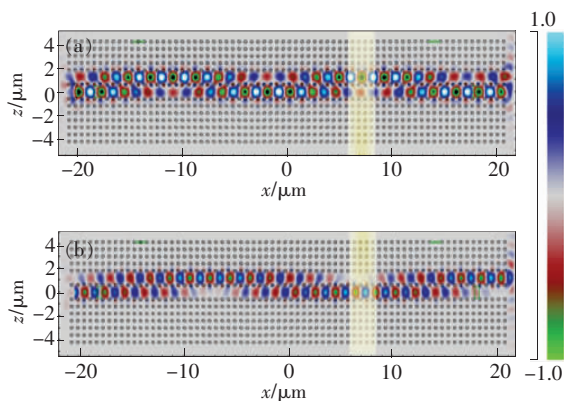


图 3 耦合结构中的场分布。(a) 波长为 1 550 nm 的电磁波场分布; (b) 波长为 1 490 nm 的电磁波场分布。

Fig. 3 The field pattern of the coupling structure. (a) The field pattern of the electromagnetic wave with wavelength of 1 550 nm. (b) The field pattern of the electromagnetic wave with wavelength of 1 490 nm.

图 4 为波长 1 550 nm 和 1 490 nm 的电磁波在耦合波导中场强度随入射长度的变化曲线,可见两种波长的电磁波其耦合周期分别为 $31a$ 和 $47a$ 。当耦合长度为 $47a$ 时,1 550 nm 的电磁波刚好完成 1.5 个耦合周期,场分布主要集中在耦合波导中,主波导中场分布极小。而对于 1 490 nm 的电磁波正好为一个耦合周期,其场分布集中于

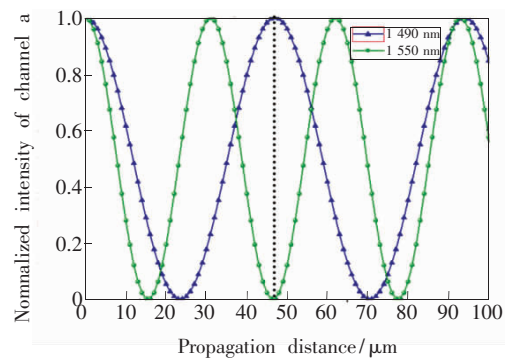


图 4 电磁波场强度随耦合长度的变化曲线
Fig. 4 The normalized intensity of the channel a as a function of the propagation distance

主波导中。若此时通过改变波导走向的方式中断二者之间的耦合,则可以实现对两束电磁波的分光。

图 5 (a) 即为所设计的二维光子晶体定向耦合器的结构示意图,其由主波导和耦合波导构成。图 5 (b) 为主波导和耦合波导的局部放大图,两波导间仅由一排介质柱相隔。图 5 (c) 给出了光子晶体定向耦合器的二维结构图,可见该结构光子晶体定向耦合器的耦合长度为 $47a$ 。当两波导耦合长度达到 $47a$ 时,耦合波导发生 90° 转弯,从而将两束光分开。由于本文主要讨论主波导和耦合波导间的光耦合,故光源放置在主波导内部,电磁波从光源到器件的耦合问题可参照现有解决方案^[27]。另外,分别在主波导和耦合波导出射端放置探测器以探测出射电磁波场强度。电磁波从光源发出,其中 1490 nm 的电磁波经过耦合,从端口 a 出射,而 1550 nm 的电磁波则从端口 b 出射。

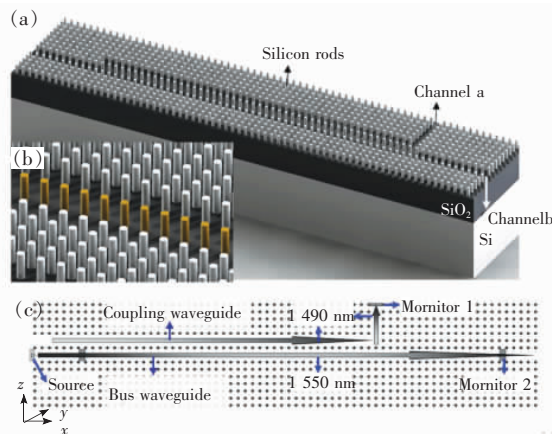


图 5 光子晶体定向耦合器的结构示意图。(a) 光子晶体定向耦合器的三维结构示意图;(b) 局部细节图;(c) 二维平面结构图。

Fig. 5 The structure schematic of the photonic crystal directional coupler. (a) The three dimensional structure diagram. (b) The local details diagram. (c) The two dimensional plane structure.

图 6 所示为光子晶体定向耦合器通入波长为 1550 nm 及 1490 nm 的电磁波时光子晶体定向耦合器的场分布图,可见定向耦合器具有滤波作用。波长 1550 nm 的电磁波从端口 b 出射,而波长 1490 nm 的电磁波从端口 a 出射。图 6 (c) 则给出了当入射光为 1550 nm 以及 1490 nm 两种波长的电磁波时,端口 a 和端口 b 处探测器得到

的出射电磁波强度以及整个器件的反射损失。端口 a 出射 1550 nm 电磁波的效率为 47.55% ,端口 b 出射 1490 nm 电磁波的效率为 45.5% ,反射损失为 6.95% ,而该耦合系统的总效率为 93.05% 。

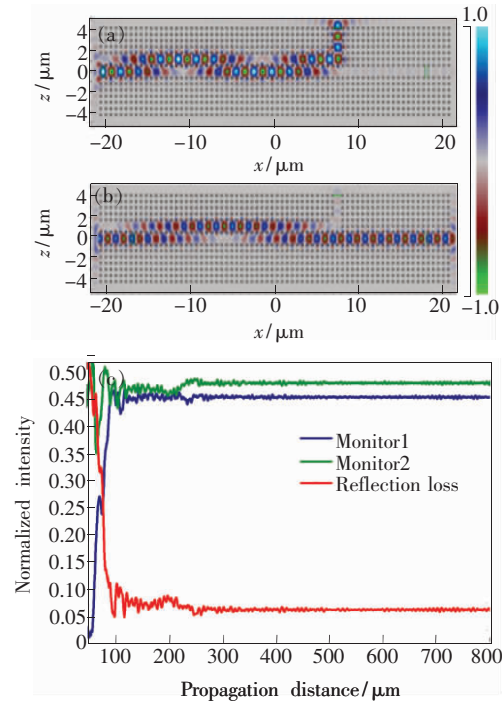


图 6 光子晶体定向耦合器的场分布以及传输效率。(a) 光子晶体定向耦合器中 1550 nm 电磁波的场分布图;(b) 光子晶体定向耦合器中 1490 nm 电磁波的场分布图;(c) 光子晶体定向耦合器各个端口的探测器值。

Fig. 6 The field pattern and the transmission efficiency of photonic crystal directional coupler. (a) The field pattern of the electromagnetic wave with wavelength of 1550 nm . (b) The field pattern of the electromagnetic wave with wavelength of 1490 nm . (c) The monitor values of the channel a, channel b and the reflection loss.

相对于基于光子晶体谐振腔的耦合器件,基于波导间耦合的波长选择器件具有设计相对简单、容差高、对工艺要求低等优点。但同时也具有体积较大、结构不够紧凑的缺点。对于基于波导间耦合的波长选择器件,要想实现对 λ_1 和 λ_2 两波长电磁波的分光,需要具备的一个必要条件:

$$nT_1 = (m + 0.5) T_2 \text{ 或 } (n + 0.5) T_1 = mT_2, \quad (1)$$

其中 $n, m = 0, 1, 2, \dots$, T_1 和 T_2 分别为波长 λ_1 和

λ_2 的耦合周期。电磁波的耦合周期通常和波长成反比, 所以要想尽量控制器件的体积, 就需要合理的设计 T_1 和 T_2 的值, 并尽量减小 m 和 n 。显然, 耦合周期越小, 实现波长分光所需的耦合长度就越短, 器件也就越有可能设计的更为紧凑。另外, 对于极具应用价值的波分复用器件, 由于电磁波波长间隔较小, 其耦合周期更为接近, 需要更大的 m 值才能满足式 (1) 条件。如果想要尽量控制器件体积, 就必须大幅的减小耦合周期。所以减小电磁波的耦合周期可以减小定向耦合器体积, 同时为应用定向耦合器实现更为密集的电磁波滤波提供了可能。改变两波导间介质柱结构参数提供了一种缩短电磁波耦合周期的方法, 根据该方法可以设计波长间隔仅为 10 nm 的定向耦合器件。

在基于波导耦合的波分复用器件中, 主波导和耦合波导间光子晶体单元的结构参数对耦合器件的耦合特性影响极大。我们这里将主波导和耦合波导间介质柱单元沿 z 方向拉长, 这时其截面为跑道形状, 称之为跑道型介质柱, 如图 7 (a) 所示。其中拉伸长度为 t , 介质柱直径仍为 D 。图 7 (b) 给出了 1 490 nm 和 1 550 nm 波长电磁波耦合周期随拉伸长度 t 的变化曲线, 可见随着 t 的增加, 耦合周期呈减小趋势。当 $t = 0.16a$ 时, 1 490

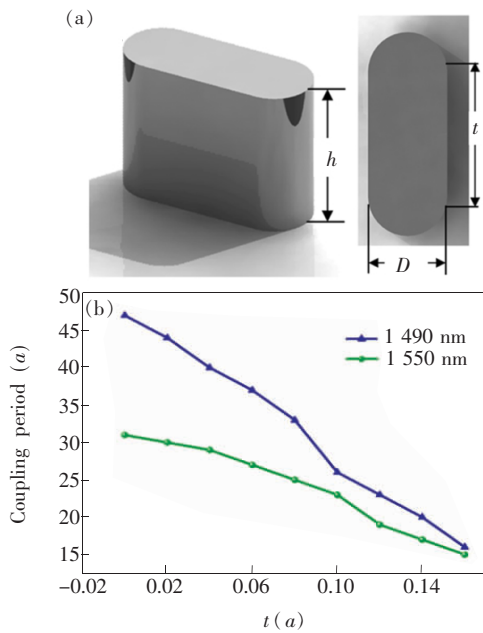


图 7 (a) 跑道型介质柱结构参数; (b) 跑道型介质柱拉伸长度对耦合周期的影响。

Fig. 7 (a) The structure parameters of the runway type rods. (b) The coupling period as a function of the stretched length.

nm 和 1 550 nm 波长电磁波的耦合周期分别仅为 $16a$ 和 $15a$ 。耦合周期的减小为缩小器件体积以及实现信道间隔更小的波分复用打下了基础。

图 8 所示为目标波长为 1 530 nm 和 1 540 nm 的光子晶体定向耦合器, 其中拉伸长度 $t = 0.3a$ 。在引入跑道型介质柱后, 该结构定向耦合器对 1 530 nm 和 1 540 nm 电磁波的耦合周期分别为 $11.5a$ 和 $11a$, 那么如果引入 $115a$ 的耦合长度, 则可以实现 1 530 nm 和 1 540 nm 电磁波的高效分波, 并可以将器件尺寸控制在 $60 \mu\text{m}$ 左右。而若不对两波导间介质柱进行优化, 则 1 530 nm 和 1 540 nm 电磁波的耦合周期分别为 $38a$ 和 $36a$, 想要实现信道间隔仅为 10 nm 左右电磁波的高效分光, 器件长度需要达到 $200 \mu\text{m}$ 以上。

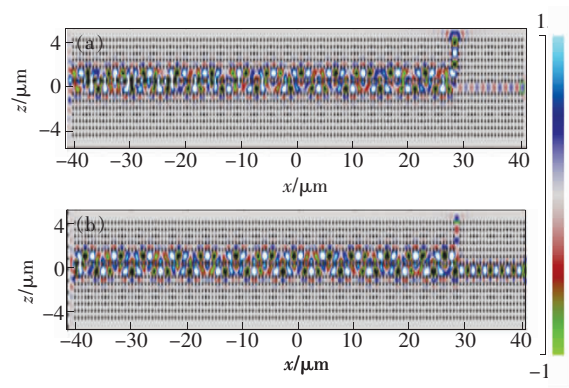


图 8 工作波长为 1 530 nm (a) 和 1 540 nm (b) 的光子晶体定向耦合器

Fig. 8 The photonic crystal directional coupler with the work wavelength of 1 530 nm (a) and 1 540 nm (b)

3 结 论

设计了基于 SOI 材料二维正方晶格介质柱阵列结构的光子晶体定向耦合器。当介质柱填充率为 0.2 且光子晶体晶格周期为 600 nm 时, 该结构定向耦合器对 1 490 nm 和 1 550 nm 电磁波的耦合周期分别为 $47a$ 和 $31a$ (a 为晶格周期)。若选择定向耦合器的耦合长度为 $47a$, 则可以将两波长电磁波分别耦合到耦合波导和主波导中并出射。经计算得到 1 490 nm 和 1 550 nm 电磁波的传输效率分别为 45.5% 和 47.75%, 系统的总效率为 93.05%, 反射损失为 6.95%, 此时器件的长度可以控制在 $30 \mu\text{m}$ 左右。另外, 主波导和耦合

波导间光子晶体单元的结构参数对耦合器件的耦合特性影响极大,将其沿着 z 方向拉伸得到跑道型介质柱结构,随着拉伸长度的增加,电磁波的耦合周期减小。当将介质柱 z 方向拉伸 $0.3a$ 时, $1\ 530\ \text{nm}$ 和 $1\ 540\ \text{nm}$ 电磁波的耦合周期分别为

$11.5a$ 和 $11a$,据此可得到该波长电磁波定向耦合器的长度仅为 $60\ \mu\text{m}$ (耦合长度为 $115a$)。通过拉伸介质柱的横向长度可以大幅减小耦合周期,这对缩小器件体积以及实现更为密集的波分复用有着重要的应用意义。

参 考 文 献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(24):2486-2489.
- [3] Xu G Y, Colombelli R, Braive R, et al. Surface-emitting mid-infrared quantum cascade lasers with high-contrast photonic crystal resonators [J]. *Opt. Exp.*, 2010, 18(11):11979-11989.
- [4] Nomura M, Ota Y, Kumagai N, et al. Zero-cell photonic crystal nanocavity laser with quantum dot gain [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(19):191108-1-3.
- [5] Safavi-Naeini A H, Alegre T P M, Winger M, et al. Optomechanics in an ultrahigh-Q two-dimensional photonic crystal cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(18):181106-1-3.
- [6] Sugisaka J, Yamamoto N, Okano M, et al. Development of curved two-dimensional photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 2008, 281(23):5788-5792.
- [7] Zhang X, Tian H P, Ji Y F. Group index and dispersion properties of photonic crystal waveguides with circular and square air-holes [J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(9):1768-1772.
- [8] Tada T, Poborchii V V, Kanayama T. Optical properties of stepped $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells [J]. *Microelectron. Eng.*, 2002, 63(1/2/3):259-256.
- [9] Jiang W, Jiang Y Q, Gu L L, et al. Photonic crystal devices for wavelength division multiplexing and slow photon generation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(S1):s5-s8.
- [10] Habibiyan H, Ghafoori-Fard H, Rostami A. Tunable all-optical photonic crystal channel drop filter for DWDM systems [J]. *J. Opt. A*, 2009, 11(6):065102-1-5.
- [11] Kuhlow B, Przyrembel G, Schlüter S, et al. Photonic crystal microcavities in SOI photonic wires for WDM filter applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, 25(1):421-431.
- [12] Wang C C, Chen L W. Tunable two-dimensional photonic crystal couplers made of dielectric elastomer inclusions [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(18):3452-3457.
- [13] Cui N D, Liang J Q, Liang Z Z, et al. Submicron-scale spatial compression of light beam through two-stage photonic crystals spot-size converter [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285(16):3453-3458.
- [14] Akahane Y, Asano T, Song B S. Investigation of high-Q channel drop filters using donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 83(8):1512-1514.
- [15] Qiu M, Jaskorzynska B. Design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(6):1074-1076.
- [16] Costa R, Melloni A, Martinelli M. Bandpass resonant filters in photonic-crystal waveguides [J]. *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 2003, 15(3):401-403.
- [17] Takano H, Song B S, Asano T, et al. Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal [J]. *Opt. Exp.*, 2006, 14(8):3491-3496.
- [18] Harkany A S, Shi S Y, Prather D W. Electro optical switching using coupled photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Exp.*, 2002, 10(20):1048-1059.
- [19] Zhou H F, Jiang X Q, Yang J Y, et al. Analysis on multimode interference coupler-based 1×3 optical switch with mono-compound modulation region [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2007, 27(9):1691-1694 (in Chinese).

- [20] Chien F S S, Hsu Y J, Hsieh W F, *et al.* Dual wavelength demultiplexing by coupling and decoupling of photonic crystal waveguides [J]. *Opt. Exp.*, 2004, 12(6): 1119-1125.
- [21] Koshiba M. Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers [J]. *J. Light-wave Technol.*, 2001, 19(12): 1970-1975.
- [22] Yu T B, Wang M H, Jiang X Q, *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.
- [23] Yu T B, Jiang X Q, Liao Q H, *et al.* Self-imaging effect in photonic crystal multimode waveguides exhibiting no band gaps [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(12): 690-692.
- [24] Chen S W, Zhu G X, Yu T B, *et al.* 1 × 8 beam splitter based on photonic crystal waveguides directional coupler [J]. *Acta Opt. Sinica* (光学学报), 2009, 29(10): 2898-2904 (in Chinese).
- [25] Li B J. GeSi/Si integrated optical symmetrical directional coupler [J]. *J. Fudan Univ.*, 1999, 38(4): 405-409.
- [26] Trinh P D, Yegnanarayanan S, Jalali B. Integrated optical directional couplers in silicon-on-insulator [J]. *Electron Lett.*, 1995, 31(24): 2097-2098.
- [27] Cui N D, Liang J Q, Liang Z Z, *et al.* A photonic crystal side-coupled waveguide based on a high-quality-factor resonator array [J]. *Chin. Phys. B*, 2012, 21(3): 275-282.