

文章编号:1004-4213(2010)03-0450-5

一种新型光子晶体波导定向耦合型 超微偏振光分束器*

朱桂新¹,于天宝¹,陈淑文¹,廖清华^{1,†},刘念华¹,黄永箴²

(1 南昌大学 物理系,南昌 330031)

(2 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室,北京 100083)

摘要:将两个二维空气孔光子晶体波导平行放置,两波导之间由三排空气孔相隔,构成一个定向耦合器.数值分析了 TE(磁场平行于空气孔)和 TM(电场平行于空气孔)偏振态光波在该定向耦合器中的传播行为.结果表明,减小耦合区两波导间的一排介质柱的半径,TE 模的耦合长度减小,而 TM 模的耦合长度不变.基于此结构,设计了超微偏振光分束器,整个器件的尺寸为 $10.1 \mu\text{m}$,与已报道的 $24.2 \mu\text{m}$ 的结果相比,该器件具有更小的器件尺寸和更高的输出效率.

关键词:光子晶体波导;定向耦合器;偏振光分束器

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103903.0450

0 引言

光子晶体作为一种具有周期性介电结构的人工材料^[1-2],由于具有光子带隙的特性而引起广泛关注.在完整光子晶体中引入线缺陷,形成光子晶体波导,可实现大拐弯处的低损耗甚至零损耗的能量传输^[3].基于光子晶体波导的各种光电器件,具有体积小且易于大规模光电集成等优点.其中,由光子晶体波导构成的定向耦合器在光通信领域中尤为关键,可以用来制作光分束器^[4-6]、偏振光分束器^[7]、光开关^[8]、波分复用或解复用器^[9]、光功分器^[10]等.

偏振光分束器是集成光回路中的重要器件.目前,基于非对称 Y 型结构^[11]和多模干涉器件^[12]的偏振光分束器得到了广泛的研究,但是基于这些结构的偏振光分束器的尺寸都较大,有的甚至达到了毫米量级,因而不利于光路集成.

本文提出了一种新型的基于光子晶体波导定向耦合器的偏振光分束器.在该分束器中,组成定向耦合器的两个波导之间由三排空气孔相隔.在工作点频率处,由于全内反射的存在^[7,13-15],TM 模被限制在一个波导内传播而不发生能量的转移;由于光子局域的存在,TE 模在耦合区中发生强烈耦合,从而实现能量的转移.该分束器就是利用 TE 和 TM 两

种偏振态的光波在耦合区中的传播特性的差异将它们分开的.与已报道的结果相比,该偏振光分束器具有更小的尺寸和更高的输出效率.

1 结构及原理分析

有限长空气孔按三角晶格周期性地排列在 GaAs 材料的平板中,构成完整的二维光子晶体.整个结构的参量为:GaAs 材料的折射率 $n=3.4$,空气孔半径 $r=0.4a$,其中 a 为晶格常数.在完整光子晶体中沿 ΓK 方向去掉一排空气孔形成一个波导.将这样的两个光子晶体波导平行、邻近放置,两个波导之间由三排空气孔相隔,构成一个波导定向耦合器,如图 1.为达到实用要求,需要从第三个方向上来限

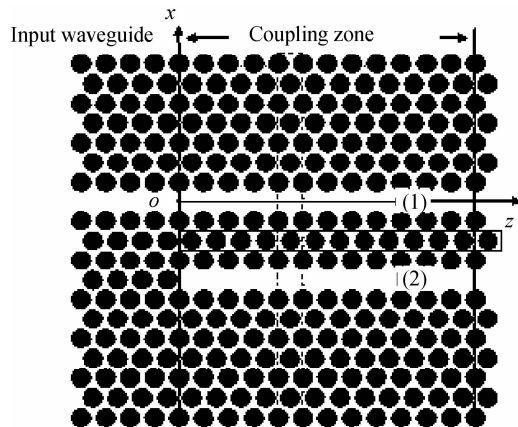


图 1 由输入波导和定向耦合器组成的超微偏振光分束器结构

Fig. 1 Schematic diagram of the ultracompact polarizing beam splitter consists of the input waveguide and directional coupler

* 集成光电子国家重点实验室(半导体研究所)开放课题、江西省教育厅科学研究课题(2007-59、GJJ08066)和江西省自然科学基金(2008GZ0006、2007GQW2057)资助

† Tel:0791-8305859

Email:lqhua@ncu.edu.cn

收稿日期:2009-03-18

修回日期:2009-09-01

制光场,这里用有效折射率代替背景平板材料的折射率来满足这一条件^[16],并由光束传播法可算出有效折射率 $n_{\text{eff}}=2.95$.

具有前文所述结构参量的完整光子晶体,对于 TM 模,不存在光子带隙,但由于波导核心区的有效折射率比核心区两侧部分的平均折射率大,满足全内反射的条件.通过全内反射, TM 模可以在波导中传播^[7,13-15];对于 TE 模,在归一化频率 范围内存在一光子禁带. 参照文献^[17],本文采用平面波展开法计算了定向耦合器的色散曲线,计算超元胞如图 1 中的矩形框所示. 图 2 给出了定向耦合器的色散曲线,在归一化频率 $a/\lambda=0.406$ 处,分束器在耦合区中支持五个传播模式. 其中,如图 2(b)中的 3 阶和 4 阶模是几条色散曲线的近解耦合点,在这里把它看成一个模式来进行计算.

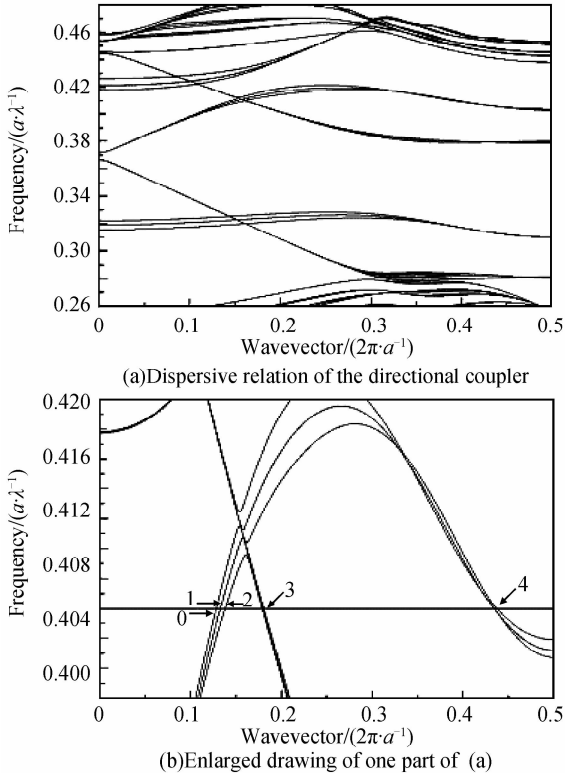


图 2 分束器中定向耦合器的色散曲线及部分放大图
Fig. 2 Dispersive relation of the directional coupler

对于 TE 模式,当光场由输入波导入射到定向耦合器中,会在耦合区激发出多个模式,多个模式发生干涉会形成输入场的像和镜像^[18-19]. 输入场可以写成多个模式的迭加

$$\Psi(x, z) = \sum_{i=0}^{p-1} c_i \varphi_i(x) \exp[-j\beta_i z] \quad (1)$$

式中, i 为导模的阶数, p 为导模的最高阶数, c_i 为场的激励因子, $\varphi_i(x) \exp[-j\beta_i z]$ 是 i 阶导模的场分布, β_i 是 i 阶导模的传播常数. 为简单起见,假设输入场在 $z=0$ 处的初始相位为 0 并把 $z=0$ 处的输入场写为

$$\Psi(x, 0) = \sum_{i=0}^{p-1} c_i \varphi_i(x) = c_0 \varphi_0(x) + c_1 \varphi_1(x) + c_2 \varphi_2(x) + c_3 \varphi_3(x) + \dots \quad (2)$$

传播到 $z=L$ 处,场分布可表示为

$$\Psi(x, L) = \sum_{i=0}^{p-1} \exp[-j\beta_i z] = c_0 \varphi_0(x) \exp[-j\beta_0 L] + c_1 \varphi_1(x) \cdot \exp[-j\beta_1 L] + c_2 \varphi_2(x) \exp[-j\beta_2 L] + c_3 \varphi_3(x) \exp[-j\beta_3 L] + \dots \quad (3)$$

可见由于多个模式间发生干涉,光场将形成新的分布,能量在空间的分布情况随相干长度而发生变化. 要使光波在图 1 中的(1)端输出,必须形成输入场的对称像,应满足

$$\Psi(x, L) = \Psi(x, 0) \quad (4)$$

而光波在图 1 中的(2)端输出(镜像)应满足的条件为

$$\Psi(x, L) = \Psi(-x, 0) \quad (5)$$

根据本征模式的奇偶性,有

$$\Psi_i(-x) = \begin{cases} \Psi_i(x) & (i \text{ 为偶数}) \\ -\Psi_i(x) & (i \text{ 为奇数}) \end{cases} \quad (6)$$

结合式(3)、(4)、(6),得到图 1 中(1)端输出时应满足的条件为

$$\beta_i L = 2k_i \pi \quad (k_i = 1, 2, 3 \dots) \quad (7)$$

由式(3)、(5)、(6),得到图 1 中(2)端输出时应满足的条件为

$$\beta_i L = \begin{cases} 2k_i \pi & (i \text{ 为偶数}, k_i = 1, 2, 3 \dots) \\ 2(k_i - 1) \pi & (i \text{ 为奇数}, k_i = 1, 2, 3 \dots) \end{cases} \quad (8)$$

2 结果与讨论

选取工作频率为归一化频率 $a/\lambda=0.406$,含有 TE 和 TM 两种偏振模式的入射波的横向分布为高斯型(若取晶格常数 $a=0.6293 \mu\text{m}$,则该归一化频率对应波长为 $\lambda=1.55 \mu\text{m}$,正好是光通信中常用的波长),对于 TE 模,根据上面的平面波展开法可计算出在耦合区中各阶模对应的传播常数,再由式(8),可计算得到耦合区中输入场的第一个镜像的位置. 表 1 中列出了 $a/\lambda=0.406$ 处,传播常数 β_i 和输入场的第一个镜像的位置 L_{m_1} 的计算值. 输入场的第一个镜像位置可取为 $L_{m_1}=19.198442a$,在 L_{m_1} 的奇数倍的位置处同样也会出现输入场的镜像,在 L_{m_1} 的偶数倍的位置处会出现输入场的像,输入场的镜像和像沿着传播方向交替分布. 图 3(a)给出了采用时域有限差分法计算得到的定向耦合器(耦合区长度为 $56a$)中 TE 模的坡印廷矢量分布,从图中可以看出,在 $L_{m_1}=18.5a$ 处出现输入场的第一个镜像,在 $L_s=37a$ 处出现输入场的第一个像,这与表 1 的计算结果基本吻合.

表 1 归一化频率 $a/\lambda=0.406$ 处,传播常数 β_i 和第一个镜像的位置 L_{m_1} 的计算值

Table 1 The calculated value of β_i and L_{m_1} at $a/\lambda=0.406$

i	k	$\beta_i(2\pi/a)$	$L_{m_1}=k\pi/\beta_i$
0	5	0.128	19.531 25a
1	5	0.133	18.939 39a
2	5	0.138	18.382 35a
3	7	0.179	19.553 07a
4	17	0.434	19.585 25a
L_{m_1} average			
			19.198 442a

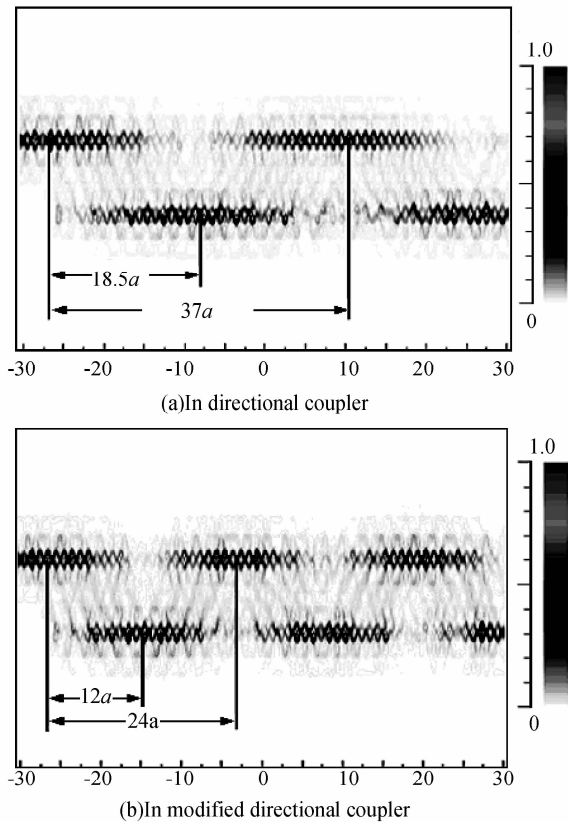


图 3 归一化频率 $a/\lambda=0.406$ 处,TE 模在结构未调整和微调的定向耦合器中的坡印廷矢量分布

Fig. 3 Time-averaged poynting vector distributions of TE light at $a/\lambda=0.406$ in directional coupler and modified directional coupler

微调定向耦合器的结构,使图 1 中实线矩形框所示的一排介质柱的半径 $r=0.38a$. 图 3(b)给出了结构微调后的定向耦合器(耦合区长度为 $56a$)中 TE 模的坡印廷矢量分布. 从图中可以看出,在 $L_{m_1}=12a$ 处出现了输入场的第一个镜像,在 $L_s=24a$ 处出现了输入场的第一个像,与耦合区结构未调整的情况相比,第一个镜像和像的位置大大缩短. 对于 TM 模,由于耦合区中两波导之间有三排空气孔相隔, TM 模不发生耦合(或认为其耦合长度较大),几乎完全被限制在波导 1 中传播^[15].

基于光波在定向耦合器中传播行为的这种差别,本文设计了光子晶体波导定向耦合型偏振光分

束器. 该偏振光分束器由一个输入波导和一个定向耦合器组成. 在完整光子晶体中沿 ΓK 方向去掉一排空气孔形成一个输入波导,在完整光子晶体中沿 ΓK 方向去掉两排空气孔,形成两个波导,两个波导之间由三排空气孔相隔构成定向耦合器. 图 1 给出了偏振光分束器的结构示意图,实线矩形框所示的介质柱的半径是经过微调的. 这里未考虑输出波导,在必要时可加一个弯曲型输出波导. 从前文的结果可知,对于 TE 模,输入场的第一个镜像位置在 $L_{m_1}=12a$. 为了得到紧凑的结构,耦合器的长度选择为输入场的第一个镜像位置的长度. 为了保证晶格周期的完整性,耦合长度的选择又必须是晶格常数 a 的整数倍. 所以,分束器的耦合长度选择为 $12a$,整个器件的长度为 $10.1 \mu\text{m}$. 显然这种光子晶体波导定向耦合型偏振光分束器具有尺寸微型化的优点,易于大规模光路集成.

采用时域有限差分法计算和模拟两种偏振光在这种分束器中的传播行为. 图 4 给出了归一化频率 $a/\lambda=0.406$ 处, TM 模和 TE 模在分束器中的坡印廷矢量分布,可以清楚地看出, TM 偏振的光波能量几乎完全限制在波导(1)中,透射率达到 99% 以上. TE 偏振的光波在波导(1)中传播的过程中,能量逐

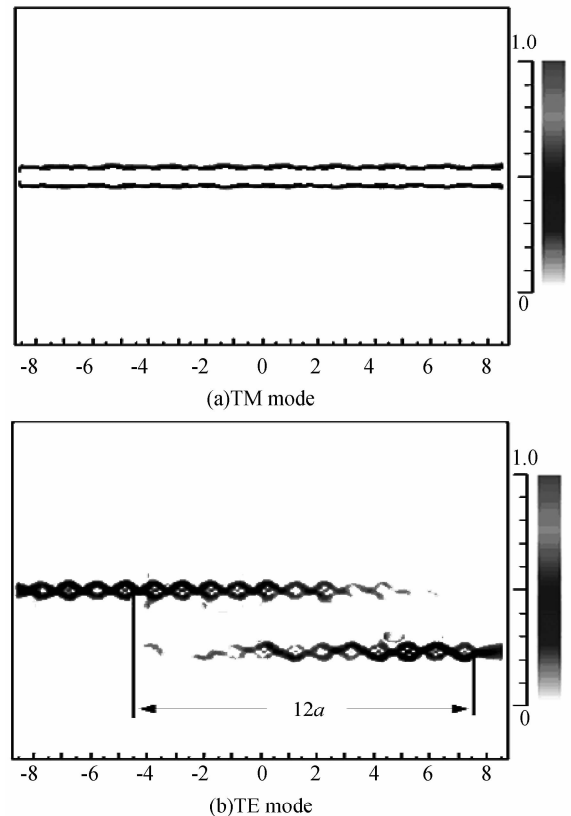


图 4 归一化频率 $a/\lambda=0.406$ 处, TM 模和 TE 模在超微偏振光分束器中的坡印廷矢量分布

Fig. 4 Time-averaged poynting vector distributions of TM light and TE modes at $a/\lambda=0.406$ in the ultracompact polarizing beam splitter

渐转移到波导(2)中,传播到 $L_{m_1} = 12a$ 处,99% 以上的光场能量都转移到了波导(2)中. 这样,分束器就有效地将两种不同偏振态的光波分开了.

为了得到分束器的输出效率,本文采用时域有限差分法,对中心归一化频率为 $a/\lambda = 0.406$,含有 TE 和 TM 两种不同偏振态的高斯脉冲在分束器中的传输效率进行了计算,计算结果如图 5. 对于 TM 模,计算的归一化频率范围为 $a/\lambda = 0.3 \sim 0.5$,在整个归一化频率范围内,从波导(1)中输出的透射率都达到 99% 以上,只在 $a/\lambda = 0.308, 0.454$ 和 0.485 附近,从波导(1)中输出的透射率有很小的降幅. 这些频率处,透射率的下降是由于分布布喇格反射所引起的. TM 模在很宽的归一化频率范围内具有很高的透射率,是因为耦合区两波导间有三排空气孔相隔, TM 模依靠全内反射机制传播,因而 TM 模耦合长度很大且随归一化频率的变化不敏感. 对于 TE 模,本文计算的归一化频率范围为 $a/\lambda = 0.395 \sim 0.410$,在 $a/\lambda = 0.395 \sim 0.4$ 范围内,TE 模从波导(2)中输出的透射率较低,低于 60%;在 $a/\lambda = 0.4 \sim 0.403$ 范围内,TE 模从波导(2)中输出的透射率较高,随归一化频率的增加,透射率从约 60% 增加到 90%;在 $a/\lambda = 0.403 \sim 0.407$ 范围内,TE 模从波导 2 中输出的透射率达到 90% 以上,在 $a/\lambda = 0.406$ 处,达 99% 以上;在 $a/\lambda = 0.407 \sim$

0.410 的范围内,TE 模从波导(2)中输出的透射率下降较快. 在中心归一化频率 $a/\lambda = 0.406$ 附近,TE 模从波导(2)中输出的透射率很高,偏离中心频率处,从波导(2)中输出的透射率下降较快,是因为偏离中心归一化频率处,TE 模在定向耦合器中的耦合长度变化比较大,输入场的第一个镜像位置的长度值 L_{m_1} 偏离分束器的耦合区的长度,造成从波导 2 中输出的透射率下降较快. 这些有关分束器的透射率的计算,未考虑输入波导处的反射损耗. 从计算结果可知,分束器可以高效率地将两种不同偏振态的光波分开.

3 结论

本文提出了一种新型的基于光子晶体波导定向耦合器的超微偏振光分束器. 通过减小分束器耦合区两波导间的一排介质柱的半径,缩短了分束器的耦合区长度. 整个分束器的器件长度为 $10.1 \mu\text{m}$,达到了微小尺寸. 和已报道的 $24.2 \mu\text{m}$ 的结果相比,具有更小的器件尺寸和更高的输出效率,在未来的集成光回路中无疑具有重要的应用前景.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission on solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons on certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [3] MEKIS A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(18): 3787-3790.
- [4] YU T B, WANG M H, JIANG XQ, 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.
- [5] YU T B, ZHOU H F, GONG Z, et al. Ultracompact multiway beam splitters using multiple photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, **41**(9): 095101.
- [6] YANG Rui, XIE Yong-jun, JIANG Jun, et al. Characteristics of H-guides with bianisotropic split ring resonator metamaterials [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1062-1068. 杨锐, 谢拥军, 蒋俊, 等. 含有异向介质 H 形波导的特性研究 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1062-1068.
- [7] LIU T, ZAKHARIAN A R, FALLAHI M, et al. Design of a compact photonic-crystal-based polarizing beam splitter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(7): 1435-1437.
- [8] SHARKANY A, SHI S, PRATHER D W. Electro-optical switch using coupled photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2002, **10**(20): 048-1059.
- [9] 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 Express*, 2004, **12**(6): 1119-1125.
- [10] WANG Xin-hua, WANG Bin-ke, QU Shao-bo, et al. Simulation of power distribution and combination in two-dimensional photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*,

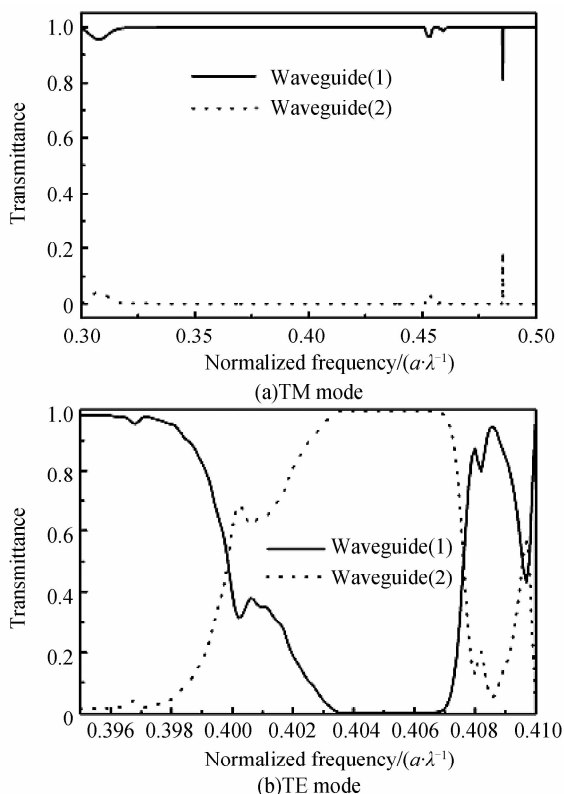


图 5 TM 模和 TE 模在偏振光分束器中的透射率
Fig. 5 The transmissivity of TM and TE modes in the ultracompact polarizing beam splitter

- 2009, **38**(6):1423-1426.
王新华,王斌科,屈绍波,等. 二维光子晶体功率分配与合成的仿真[J]. 光子学报, 2009, **38**(6):1423-1426.
- [11] WEI P, WANG W. A TE-TM mode splitter on lithium niobate using Ti, Ni and MgO diffusions[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1994, **6**(2): 245-248.
- [12] HONG J M, RYU H H, PARK S R, *et al.* Design and fabrication of a significantly shortened multimode interference coupler for polarization splitter application[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(1): 72-74.
- [13] ADIBI A, XU Y, LEE R K, *et al.* Guiding mechanisms in dielectric-core photonic - crystal optical waveguides [J]. *Phys Rev B*, 2000, **64**:033308.
- [14] BOREL P I, FRANSEN L H, THORHAUGE M, *et al.* Efficient propagation of TM polarized light in photonic crystal components exhibiting band gaps for TE polarized light[J]. *Opt Express*, 2003, **11**(15): 1757-1762.
- [15] YU Tian-bao, JIANG Xiao-qing, LIAO Qing-hua, *et al.* Self-imaging effect in photonic crystal multimode waveguides exhibiting no band gaps[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(12): 690-692.
- [16] QIU M. Effective index method for heterostructure-slab-waveguide-based two-dimensional photonic crystals[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, **81**(7): 1163-1165.
- [17] JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D. Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis[J]. *Opt Express*, 2001, **8**(3): 173-190.
- [18] KIM H J, PARK I, O B-H, *et al.* Self-imaging phenomena in multi-mode photonic crystal line-defect waveguides: application to wavelength de-multiplexing[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(23): 5625-5633.
- [19] ZHANG Yao, LI Zhang-jian, LI Bao-jun. Multimode interference effect and self-imaging crystal waveguides for terahertz waves[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(7): 2679-2689.

A New Ultracompact Polarizing Beam Splitter Based on Photonic Crystal Directional Coupler

ZHU Gui-xin¹, YU Tian-bao¹, CHEN Shu-wen¹, LIAO Qing-hua¹, LIU Nian-hua¹, HUANG Yong-zhen²

(1 Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

(2 State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Two photonic crystal waveguides with triangular lattice of air holes together, between which there are three rows of air holes, are put in parallel to construct a directional coupler. The propagation of TE (electric field parallel to the axis of the air holes) and TM (magnetic field parallel to the axis of the air holes) polarizing lights in the proposed directional coupler is analyzed numerically. The results show that the coupling length of TE light is reduced whereas the coupling length of TM light do not change when the radius of one row of the dielectric rods between the two waveguide of the coupler are modified. On the basis of this structure, ultracompact polarizing beam splitter is designed and the length of the device is only 10.1 μm . Compared with the previous results of 24.2 μm , this device is smaller and more efficient.

Key words: Photonic crystal waveguides; Directional coupler; Polarizing beam-splitter



ZHU Gui-xin was born in 1979. He received his M. S. degree from Physics Department, Nanchang University in 2009. His research interests focus on photonic crystals theory and the device design based on the photonic crystals defects.



LIAO Qing-hua was born in 1968. He received his Ph. D. degree from Nanchang University in 2005. Now his research interests focus on the theory and application of photonic crystals.