

基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析

付培栋¹, 陈鹤鸣²

¹南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023; ²南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种 1550 nm 波长的二维正方晶格光子晶体三模式模分复用/解复用器。该器件由两个非对称定向耦合结构组成, 可以实现 TE_0 、 TE_1 和 TE_2 模式的模分复用与解复用。同时为了防止波导耦合处的模式失配问题, 波导耦合处采用了渐变结构。利用时域有限差分法和平面波展开法对其性能进行分析, 结果表明: 该器件在 1550 nm 波长 TE_0 、 TE_1 和 TE_2 模式的模分复用/解复用的插入损耗低于 0.14 dB, 信道串扰低于 -20 dB。

关键词 光通信; 光子晶体; 模分复用/解复用; 模式转换

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020602

Design and Performance Analysis of Three-Mode Division Multi/Demultiplexer Based on Two-Dimensional Photonic Crystals

Fu Peidong¹, Chen Heming²

¹ College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

² Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A three-mode division multiplexer and demultiplexer based on two-dimensional square-lattice photonic crystal with wavelength of 1550 nm was designed. Two asymmetrical directional couplers are included, which can achieve modes conversion function of TE_0 , TE_1 and TE_2 modes. In order to avoid phase mismatching in bus waveguide, taper structure is applied at waveguide junction which can reduce the insertion loss effectively. Plane waves method and finite difference time domain methods are used to simulate the performance. Numerical simulations show that the designed device has the potential for high-capacity mode division multiplexing optical communication systems with insertion loss less than 0.14 dB and mode crosstalk less than -20 dB.

Key words optical communications; photonic crystal; mode division multi/demultiplexing; mode conversion

OCIS codes 060.4230; 060.4510; 050.5298

1 引言

在光网络发展中, 为了满足指数型的容量增长, 波分复用技术成为数据光网络的重要技术形态^[1-2]。然而, 近期的研究表明波分复用光传输的容量增长正在明显减速, 而且其系统实验正在接近非线性光纤传输的香农极限, 限制了全光通信的发展, 在此背景下模分复用技术应运而生。模分复用技术利用各模式间的正交性, 以有限的稳定模式作为独立信道传递信息, 可以成倍提高系统容量和频谱效率, 是一种崭新的多输入多输出光传输形式, 是未来突破光纤香农极限的研究方向之一。

在模分复用光通信系统中, 模分复用/解复用器(MMUX/DEMUX)是实现模分复用的关键器件, 已成为模分复用系统领域的研究热点。目前, 模分复用/解复用器大致可以分为基于平面不对称平行波导型^[3-6]、多模

收稿日期: 2016-09-30; **收到修改稿日期:** 2016-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61077084, 61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)、江苏省研究生科研创新计划项目(KYLX15_0835)

作者简介: 付培栋(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: fpdast@163.com

干涉型^[7-8]、硅基 Y 型连接波导^[9-11]、少模光纤^[12-14]等。其中 Driscoll 等^[9]提出了基于硅基波导,采用 Y 型交叉连接器的模分复用/解复用器,其损耗范围为 0.1~0.7 dB,性能优良,但 Y 型波导间的夹角直接影响器件的性能好坏,必须精确控制其大小,实际制作难度较大。Yang 等^[8]提出了基于硅基波导,采用不对称平行波导的三模式模分复用/解复用器,其信道串扰最差为 -10 dB,信道串扰性能指标还有待提高。Ding 等^[8]提出了基于渐变波导的硅基模分复用器,可实现抗工艺误差的双模式复用,但其信道串扰只有 -16 dB,性能有待提高。

本文提出了一种基于二维光子晶体的三模式模分复用/解复用器,在正方晶格硅(Si)光子晶体平板中移除一排介质柱形成单模波导,调节单模波导宽度形成 TE₀ 和 TE₁ 的双模波导,调节双模波导宽度形成 TE₀、TE₁ 和 TE₂ 的三模波导。同时在上述各波导之间采用了波导宽度渐变的结构,有效抑制了不同多模波导之间的模式失配问题。在此基础上采用非对称平行波导结构完成了 1550 nm 波长 TE₀ 模式到 TE₁ 模式和 TE₂ 模式的转换,可以实现 1550 nm 波长 TE₀、TE₁ 和 TE₂ 三个模式的复用和解复用,该器件具有尺寸小、插入损耗低、信道串扰低、易于集成等特点、在模分复用光通信系统中具有一定的应用价值。

2 结构模型和原理分析

2.1 结构模型

提出的光子晶体模分复用/解复用器结构如图 1 所示,采用空气基底,由 56×19 圆形硅介质柱组成的二维正方晶格光子晶体,在其完整结构的基础上移除一排介质柱形成单模波导 G1,增大单模波导 G1 宽度形成双模波导 G2,增大双模波导 G2 宽度形成三模波导 G3,同时引入两个直角单模波导 G4 和 G5。直角单模波导 G4 与双模波导 G2 组合构成 TE₀ 和 TE₁ 模式转换区 P₀₁;直角单模波导 G5 与三模波导 G3 组合构成 TE₀ 和 TE₂ 模式转换区 P₀₂。并且在两个模式转换区都引入宽度沿 z 轴线性变化的波导将不同波导有效地衔接,从而可以有效抑制由模式失配引起的反射损耗。

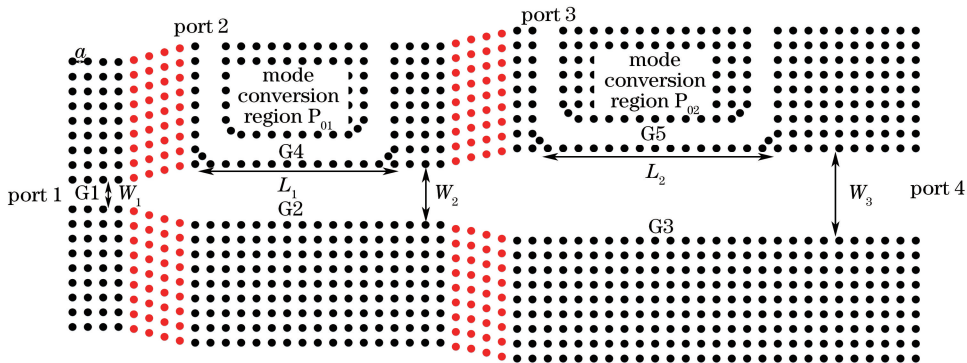


图 1 基于光子晶体的三模式模分复用器结构图

Fig. 1 Structure of three-mode photonic crystal MMUX

该器件的结构参数为:晶格常数 $a = 0.55 \mu\text{m}$,硅介质柱半径 $r_1 = 0.1 \mu\text{m}$,折射率 $n_1 = 3.4$,单模波导宽度 $W_1 = 2a = 1.1 \mu\text{m}$ 。TE₀ 和 TE₁ 模式转换区的结构参数为:双模波导宽度 $W_2 = 2.04 \mu\text{m}$,不对称平行波导间相隔一排介质柱,耦合长度为 $L_1 = 12a = 6.6 \mu\text{m}$,渐变波导宽度以斜率 0.31 线性增大。TE₀ 和 TE₂ 模式转换区的结构参数为:三模波导宽度 $W_3 = 3.02 \mu\text{m}$,不对称平行波导间相隔一排介质柱,耦合长度为 $L_2 = 15a = 8.25 \mu\text{m}$,渐变波导宽度以斜率 0.247 线性增大。

2.2 模分复用/解复用原理

设计的模式转换区如图 2(a)所示,光波在传输过程中不断耦合进入相邻波导,并伴随着模式转换,即复用过程为波导 1 中传播的基模光波不断耦合进入波导 2 并同时转换为高阶模。解复用过程为波导 2 中传播的高阶模光波不断耦合进入波导 1 并同时转换为基模。这种模式转换结构可以等效为同向波导耦合模型,因此可以根据横向耦合模理论对此结构进行分析^[15-17],此时两个耦合模的线性微分方程可写为

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -j\beta_1 A_1(z) + jcA_2, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -j\beta_2 A_2(z) + jcA_1, \quad (2)$$

式中 A_1 、 A_2 表示两个模式光波的振幅, β_1 、 β_2 表示两个波导的传播常数, c 表示耦合系数。假定 c 为常数, 引入边值条件 $A_1(0) = 1$ 、 $A_2(0) = 0$, 经过推导可以得出耦合功率方程为

$$P_2 = |A_2|^2 = (1 + Q^{-2})^{-1} \sin^2(\sqrt{1 + Q^{-2}} cz), \quad (3)$$

$$P_1 = 1 - P_2, \quad (4)$$

式中 P_1 、 P_2 表示两个模式功率, $Q = 2c/(\beta_1 - \beta_2)$, 同时当 $Q \rightarrow \infty$ 即 $\beta_1 = \beta_2$ 时, 波导中光波振幅可表示为

$$A_1 = \cos(cz) \exp(-j\beta_1 z), \quad (5)$$

$$A_2 = j \sin(cz) \exp(-j\beta_2 z). \quad (6)$$

根据(5)式和(6)式可得出传输功率在两个波导间能够完全地周期性耦合如图 2(b)所示, 可见对横向耦合来说传播常数适配是影响耦合效率的关键。

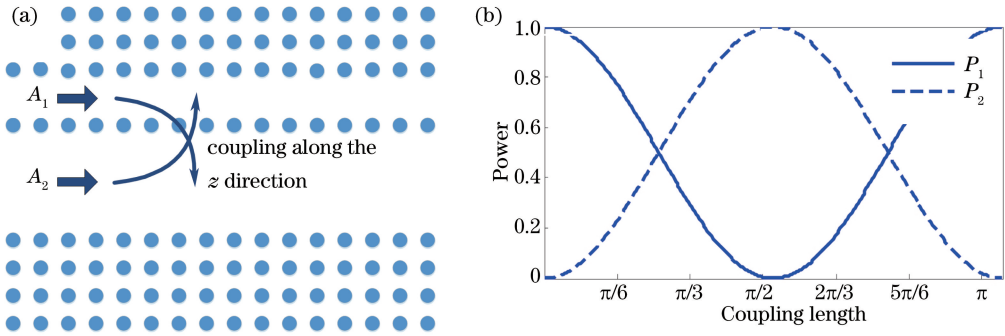


图 2 (a)模式转换区结构; (b)当 $Q \rightarrow \infty$ 时, 两波导的光波能量随耦合长度变化曲线

Fig. 2 (a) Structure of mode conversion area; (b) periodic power versus coupling length when $Q \rightarrow \infty$

按照上述分析, 设计本文所提出的结构, 即在模式转换区 P_{01} 中, TE_0 模式在直角单模波导中的传播常数与 TE_1 模式在双模波导中的传播常数相等。在模式转换区 P_{02} 中, TE_0 模式在直角单模波导中的传播常数与 TE_2 模式在三模波导中的传播常数相等。在本文设计的结构中 $1.55 \mu\text{m}$ 波长对应的归一化频率为 $0.354 \times 2\pi a/c$, 该频率在直角单模波导中对应归一化传播常数 K 为 0.206 , 如图 3(a)所示, 波导宽度与各模式传播常数曲线如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以清楚看出要满足 G2 和 G3 波导归一化传播常数为 0.206 , G2 和 G3 波导宽度须分别取 $2.04 \mu\text{m}$ 和 $3.02 \mu\text{m}$ 。

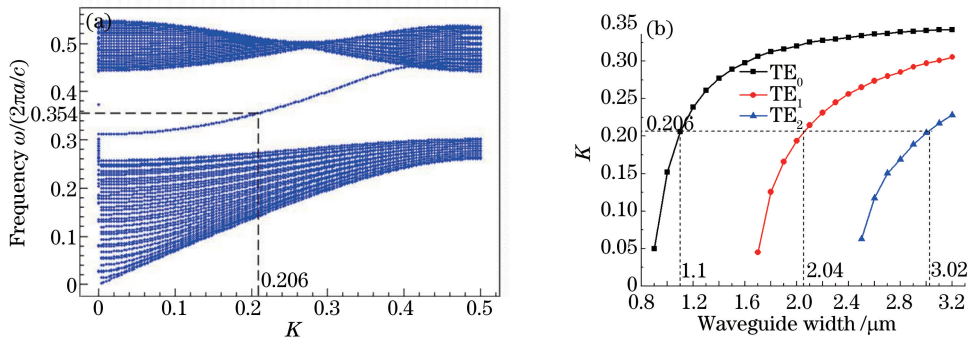


图 3 (a)直角单模波导归一化频率曲线; (b)公共波导传播常数随波导宽边变化曲线

Fig. 3 (a) Normalized frequency curve of single-mode waveguide with right angle;

(b) propagation constant curve of bus waveguide

在此基础上, 通过调节模式转换区的耦合长度, 使其转换效率达到最高, 经基于时域有限差分法 (FDTD) 的 Rsoft 软件计算得到如图 4 所示结果。从图 4(a)可知, $1.55 \mu\text{m}$ 的光波在单模和双模波导中交替转换成 TE_0 模与 TE_1 模进行传输, 其耦合长度为 $12a = 6.6 \mu\text{m}$ 。从图 4(b)可知, $1.55 \mu\text{m}$ 的光波在单模和三模波导中交替转换成 TE_0 模与 TE_2 模进行传输, 其耦合长度为 $15a = 8.25 \mu\text{m}$ 。基于以上结构可实现 TE_0 模耦合进入公共波导并转变为对应高阶模的复用过程。

同时, 为了保证各个公共波导间能够有效耦合, 采用一种渐变波导结构用于各模式转换区的衔接处。未采用渐变结构的公共波导如图 5(a)所示, 采用了渐变波导的公共波导如图 5(b)所示。经基于 FDTD 的

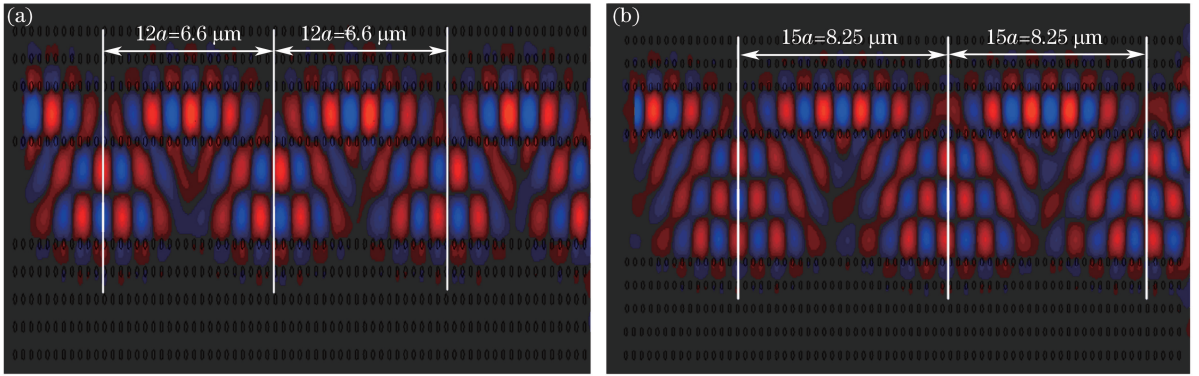


图 4 (a) TE_0 与 TE_1 (b) TE_0 与 TE_2 相互转换的模式稳态场强分布图

Fig. 4 Steady field intensity distribution for mode conversion (a) TE_0 and TE_1 and (b) TE_0 and TE_2

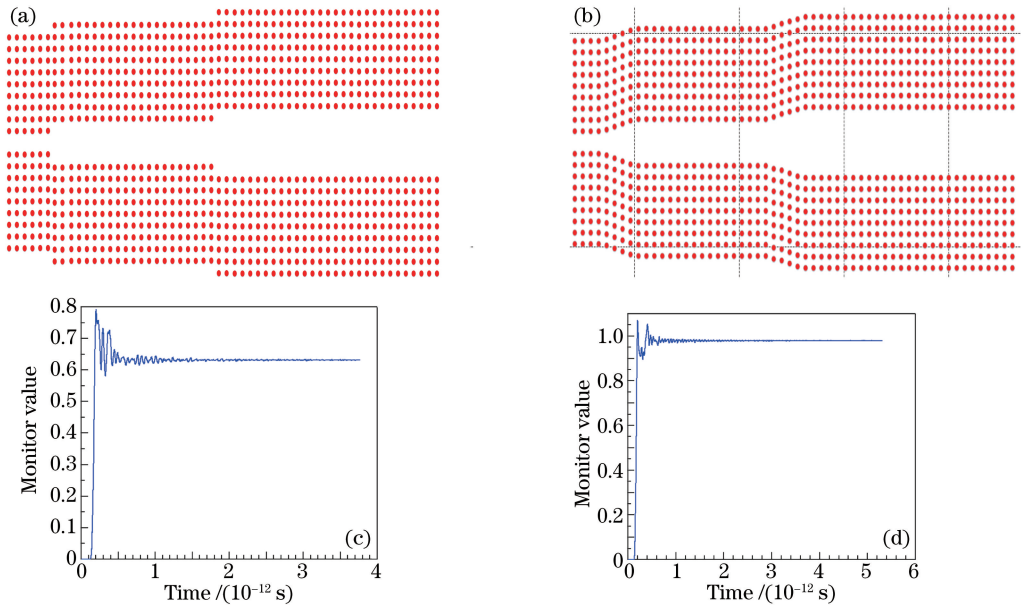


图 5 (a) 未包含渐变波导的公共波导结构; (b) 包含渐变波导的公共波导结构;

(c) 未包含渐变波导时, 波导透射率示意图; (d) 包含渐变波导时, 波导透射率示意图

Fig. 5 (a) Structure without tapered waveguide; (b) structure with tapered waveguide;

(c) transmittance without tapered waveguide; (d) transmittance with tapered waveguide

Rsoft 软件计算得到未采用渐变波导结构的公共波导其透射率明显低于采用了渐变波导的结构, 结果如图 5 (c)、5(d)所示。可以看出采用渐变波导衔接的结构可有效提高透射率, 抑制模式失配。

3 仿真结果与分析

3.1 模分复用仿真分析

利用 FDTD 仿真分析本文设计的光子晶体三模式模分复用器的性能。对于复用过程, 在端口 1 输入波长为 1550 nm 的 TE_0 模光波, 其稳定模场图如图 6(a)所示, 图 6(a)表示波导 G1 中 TE_0 模光波在传输过程中没有发生任何模式转换最终进入波导 G3。同时检测耦合进波导 G3 的透射率 T_{1-3} , 耦合进入波导 G4 的透射率 T_{1-4} , 以及耦合进入波导 G5 的透射率 T_{1-5} , 结果如图 6(b)~(d)所示。

同理在端口 2 输入波长为 1550 nm 的 TE_0 模, 其稳定模场图如图 7(a)所示, G4 波导中 TE_0 模转换为 TE_1 模耦合进入主波导并最终进入波导 G3。同时检测耦合进波导 G3 的透射率 T_{4-3} , 耦合进入波导 G1 的透射率 T_{4-1} , 以及耦合进入波导 G5 的透射率 T_{4-5} , 结果如图 7(b)~(d)所示。

同理在端口 3 输入波长为 1550 nm 的 TE_0 模, 其稳定模场图如图 8(a)所示, G5 波导中 TE_0 模转换为

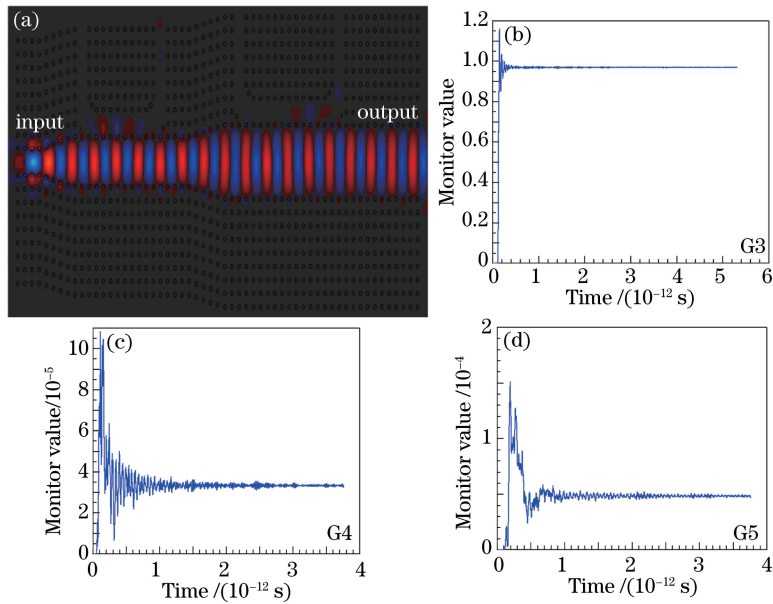


图 6 (a)复用过程 TE_0 稳定模场分布图;(b)~(d)复用过程各波导的透射率

Fig. 6 (a) Steady field intensity distribution for TE_0 MMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide MMUX

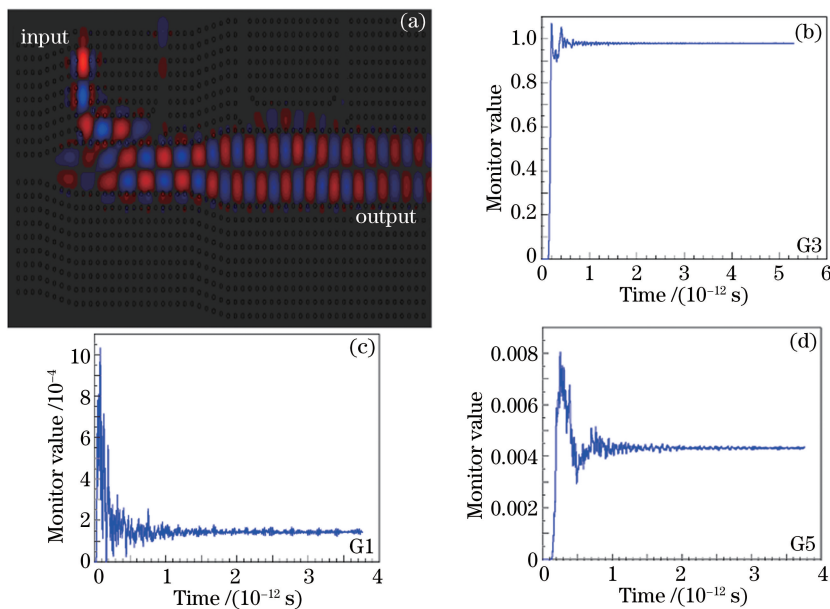


图 7 (a)复用过程 TE_1 稳定模场分布图;(b)~(d)复用过程各波导透射率

Fig. 7 (a) Steady field intensity distribution for TE_1 MMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide MMUX

TE_2 模耦合进入主波导并最终进入波导 G3。同时检测耦合进波导 G3 的透射率 T_{5-3} , 耦合进入波导 G1 的透射率 T_{5-1} , 以及耦合进入波导 G4 的透射率 T_{5-4} , 结果如图 8(b)~(d)所示。由上述可知, 1550 nm 波长 TE_0, TE_1 模的复用透射率较高, 达到 97.5% 以上, 1550 nm 波长 TE_0, TE_2 模的复用透射率高达 98% 以上, 并且耦合进相邻信道的辐射强度都较低, 达到 10^{-3} 量级。

3.2 模分解复用仿真分析

同理对解复用过程进行仿真分析, 在端口 4 输入波长为 1550 nm 的 TE_0 模光波, 其稳定模场图如图 9 (a)所示, G3 波导中 TE_0 模光波在传输过程中没有发生任何模式转换最终进入波导 G1。同时检测耦合进入波导 G1 的透射率 T_{3-1} , 耦合进入波导 G4 的透射率 T_{3-4} , 以及耦合进入波导 G5 的透射率 T_{3-5} , 结果如图 9 (b)~(d)所示, 其透射率为 97%。

同理在端口 4 输入波长为 1550 nm 的 TE_1 模光波, 其稳定模场图如图 10(a)所示, G3 波导中 TE_1 模转

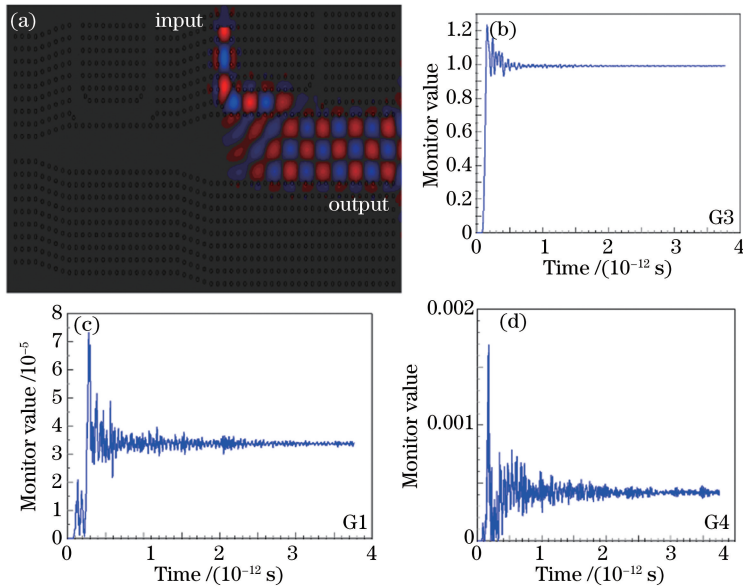


图 8 (a)复用过程 TE_2 稳定模场分布图;(b)~(d)复用过程各波导的透射率

Fig. 8 (a) Steady field intensity distribution for TE_2 MMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide MMUX

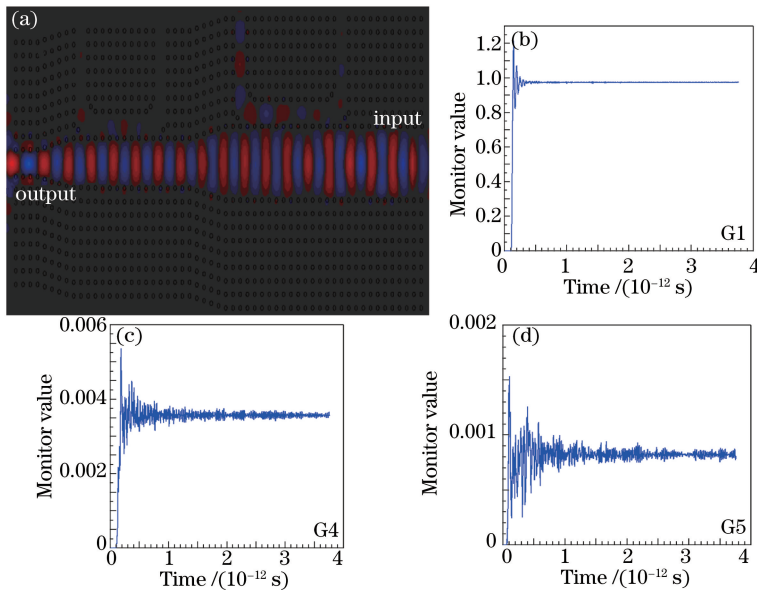


图 9 (a)解复用过程 TE_0 稳定模场分布图;(b)~(d)解复用过程各波导透射率

Fig. 9 (a) Steady field intensity distribution for TE_0 DEMMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide DEMMUX
 换为 TE_0 模并最终耦合进入波导 G4。同时检测耦合进波导 G4 的透射率 T_{3-4} ，耦合进入波导 G1 的透射率 T_{3-1} ，以及耦合进入波导 G5 的透射率 T_{3-5} ，结果如图 10(b)~(d)所示，其透射率为 96.8%。

同理在端口 4 输入波长为 1550 nm 的 TE_2 模光波，其稳定模场图如图 11(a)所示，G3 波导中 TE_2 模转换为 TE_0 模并最终耦合进入波导 G5。同时检测耦合进波导 G5 的透射率 T_{3-5} ，耦合进入波导 G1 的透射率 T_{3-1} ，以及耦合进入波导 G4 的透射率 T_{3-4} ，结果如图 11(b)~(d)所示，其透射率为 98.7%，但此时耦合进入 G1 波导强度较大，只有 10^{-2} 量级。

3.3 模分复用器性能指标

信道串扰与插入损耗是衡量模分复用器件性能的重要指标。信道串扰定义为相邻信道对传输信道的串扰程度，其表达式为

$$C = 10\lg(S/T), \quad (7)$$

式中 S 表示相邻信道进入传输信道的光强， T 表示传输信道的透射光强。插入损耗定义为器件插入前后的功率比，通常表示为

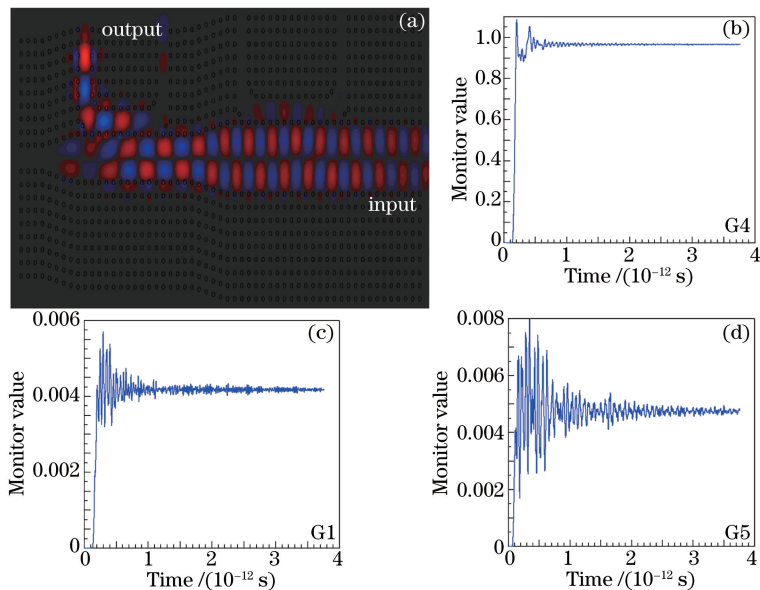


图 10 (a)解复用过程 TE_1 稳定模场分布图；(b)~(d)解复用过程各波导透射率

Fig. 10 (a) Steady field intensity distribution for TE_1 DEMMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide DEMMUX

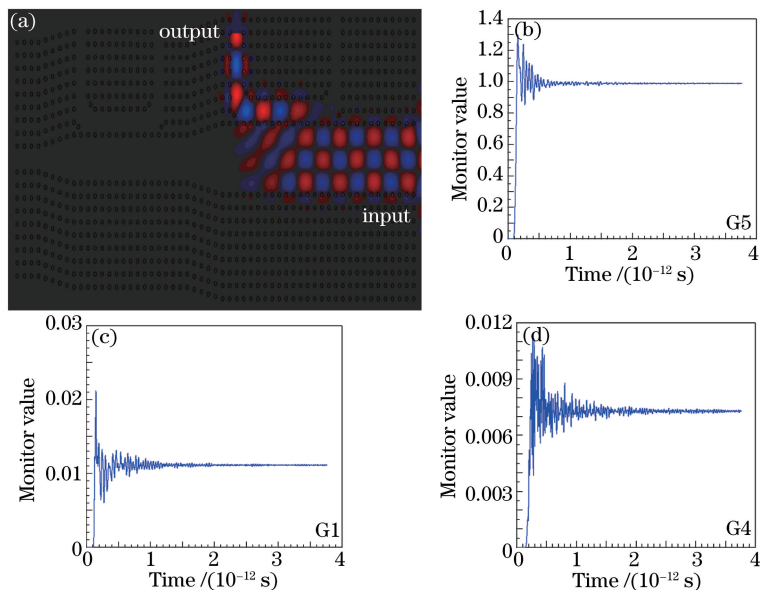


图 11 (a)解复用过程 TE_2 稳定模场分布图；(b)~(d)解复用过程各波导透射率

Fig. 11 (a) Steady field intensity distribution for TE_2 DEMMUX; (b)-(d) transmittance of each waveguide DEMMUX

$$C_T = -10\lg(P_o/P_i), \quad (8)$$

式中 P_o 表示器件插入后的输出功率, P_i 表示器件插入前的输出功率。将仿真结果带入(7)、(8)式中, 得到本文所设计的光子晶体三模式模分复用/解复用器的信道串扰性能指标如表 1 所示。复用过程中 TE_0 , TE_1 和 TE_2 插入损耗分别为: 0.14 dB, 0.09 dB 和 0.04 dB。解复用过程中 TE_0 , TE_1 和 TE_2 插入损耗分别为 0.13 dB, 0.13 dB 和 0.05 dB。

表 1 复用和解复用过程各模式串扰

Table 1 Crosstalk of the device MMUX and DEMMUX

Mode	Crosstalk of MMUX /dB			Crosstalk of DEMMUX /dB		
	TE_0	TE_1	TE_2	TE_0	TE_1	TE_2
TE_0		-44.0	-43.0		-24.4	-43.2
TE_1	-38.3		-23.7	-23.8		-23.3
TE_2	-44.0	-33.3		-20.0	-21.5	

4 结 论

提出了一种新型的基于二维光子晶体的三模式模分复用/解复用器,在完整的光子晶体结构中引入两对不对称平行波导实现了 1550 nm 通信波长 TE_0 , TE_1 和 TE_2 模式复用/解复用功能。同时利用时域有限差分法分析了其性能指标,结果表明插入损耗范围小于 0.14 dB,信道串扰达到 -20 dB 以下,器件尺寸仅为 $31 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。该器件结构简单、可以利用半导体工艺制作,对模分复用光通信系统具有一定价值。

参 考 文 献

- [1] Niemi T, Frandsen L H, Hede K K, *et al.* Wavelength-division demultiplexing using photonic crystal waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 226-228.
- [2] Nozaki K, Kuramochi E, Shinya A, *et al.* 25-channel all-optical gate switches realized by integrating silicon photonic crystal nanocavities[J]. Optics Express, 2014, 22(12): 14263-14274.
- [3] Yang Y D, Li Y, Huang Y Z, *et al.* Silicon nitride three-mode division multiplexing and wavelength-division multiplexing using asymmetrical directional couplers and microring resonators [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 22172-22183.
- [4] Kawaguchi Y, Tsutsumi K. Mode multiplexing and demultiplexing devices using multimode interference couplers[J]. Electronics Letters, 2002, 38(25): 1701.
- [5] Uematsu T, Ishizaka Y, Kawaguchi Y, *et al.* Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(15): 2421-2426.
- [6] Zhou W, Zhuang Y, Ji K, *et al.* Multi/demulti-plexer based on transverse mode conversion in photonic crystal waveguides[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24770-24784.
- [7] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, *et al.* PLC-based four-mode multi/demultiplexer with LP_{11} mode rotator on one chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(6): 1161-1165.
- [8] Ding Y, Xu J, Da Ros F, *et al.* On-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode multiplexer and demultiplexer[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10376-10382.
- [9] Driscoll J B, Grote R R, Souhan B, *et al.* Asymmetric Y-junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1854-1856.
- [10] Chen W, Wang P, Yang J. Mode multi/demultiplexer based on cascaded asymmetric Y-junctions[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 25113-25119.
- [11] Riesen N, Love J D. Design of mode-sorting asymmetric Y-junctions[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2778-2783.
- [12] Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *et al.* Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0906010.
谢意维, 付松年, 张海亮, 等. 少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0906010.
- [13] Zhang Yulong, Jia Dagong, Li Shuai, *et al.* Study of displacement sensor based on few-mode multi-core fiber [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905006.
张玉龙, 贾大功, 李 帅, 等. 基于多芯少模光纤位移传感器的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905006.
- [14] Xu Junjiao, Li Jie, Rong Huabei, *et al.* Analysis and measurement on refractive index sensing of few mode fiber Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 565-568.
徐俊娇, 李 杰, 戎华北, 等. 少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 565-568.
- [15] Berger V. Nonlinear photonic crystals[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(19): 4136-4139.
- [16] Qian Jingren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1188-1192.
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1188-1192.
- [17] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 190-217.