

基于光子晶体的 2 波长×3 模式混合复用/解复用器研究

刘莲香¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要: 为了进一步提高光通信系统的传输容量, 提出了一种基于光子晶体的 2 波长×3 模式混合复用/解复用器, 该器件由 3 个组合谐振腔、3 个波长选择反射微腔、单模波导、多模波导和锥形渐变耦合波导组成。采用组合谐振腔和波长选择反射微腔的结构实现滤波, 利用非对称平行波导的结构实现模式转换。应用时域有限差分法进行了仿真分析, 结果表明: 该器件可以实现 1530 nm TE₀ 模、1530 nm TE₁ 模、1530 nm TE₂ 模、1550 nm TE₀ 模、1550 nm TE₁ 模和 1550 nm TE₂ 模 6 个信道的波分—模分复用和解复用, 其插入损耗 < 0.127 dB, 信道串扰 < -15.19 dB。

关键词: 光子晶体; 耦合模理论; 时域有限差分法; 锥形渐变耦合波导; 波分—模分混合复用/解复用器

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)05-0028-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on two-wavelength×three-mode hybrid multiplexer/demultiplexer based on photonic crystal

LIU Lianxiang¹, CHEN Heming^{2*}

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to further improve the transmission capacity of the optical communication system, this paper proposes a two-wavelength×three-mode hybrid multiplexer/demultiplexer based on photonic crystals. The device consists of three combined resonators, three wavelength selective reflection microcavities, single mode waveguides, multimode waveguides and tapered coupled waveguides. The filtering is realized by the structure of combined resonator and wavelength selective reflection microcavity, and the mode conversion is realized by the structure of the asymmetric parallel waveguide. The simulation analysis by time-domain finite difference method shows that the device can realize the multiplexing/demultiplexing of six channels, such as the 1530 nm TE₀ mode, 1530 nm TE₁ mode, 1530 nm TE₂ mode, 1550 nm TE₀ mode, 1550 nm TE₁ mode and 1550 nm TE₂ mode. Its insertion loss is < 0.127 dB and the channel crosstalk is < -15.19 dB.

Key words: photonic crystals; coupled mode theory; time-domain finite difference method; tapered coupled waveguide; wavelength-mode division hybrid multiplexer/demultiplexer

0 引言

随着互联网技术、远程教育、医疗以及云计算和大

收稿日期: 2019-11-06。

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

作者简介: 刘莲香(1994—), 女, 江苏省泰州人, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学光学工程专业, 主要研究方向为基于光子晶体的多信道波分—模分混合复用/解复用器, 参与了国家自然科学基金项目“高速光纤波分—模分混合复用传输系统复用/解复用器研究”。

* 通信作者: 陈鹤鸣(E-mail: chhm@njupt.edu.cn)。



数据的飞速发展, 系统的传输容量需要大大增加^[1]。目前, 光传输系统中使用的单项波分复用技术或者单项模分复用技术不能满足传输容量上的需要, 单一技术几乎达到突破极限^[2]。研究表明, 波分—模分混合复用技术可以有效地改善带宽瓶颈问题, 已经成为可以成倍增加通信容量最有效的方法之一^[3]。2015 年, Tadesse Mulugeta 等人设计了 2 种类型的波分—模分混合复用器^[4], 2 种结构的插入损耗大于 1.2 dB, 波长间隔为 240 nm。2018 年, Omnia M. Nawwar 等人提出了紧凑型的波分—模分混合复用器^[5], 该器件的串扰较大(约 -11.9024 dB), 波长间隔为 250 nm。2018 年, 柳璐等人

提出了4个信道的波分-模分混合复用/解复用器^[9],信道数较少。

本文设计一种基于光子晶体的多信道波分-模分混合复用/解复用器,可以实现2波长×3模式的6个信道的混合复用和解复用。

1 结构设计和原理分析

1.1 结构设计

本文设计的2波长×3模式混合复用/解复用器结构图如图1所示。该器件的正方晶格常数 $a=550\text{ nm}$,介质柱选用硅,其折射率 $n=3.4$,半径 $r=110\text{ nm}$ 。图1中 C_1 、 C_2 和 C_3 代表3个组合谐振腔^[7], R_1 、 R_2 和 R_3 代表3个波长选择反射微腔。模式转换区 p_{01} 由多模波导 G_1 和单模波导 g_4 构成,模式转换区 p_{02} 由多模波导 G_2 和单模波导 g_6 构成。 W_1 和 W_2 分别是多模波导 G_1 和多模波导 G_2 的宽度, $W_1=3.796a=2.0878\text{ }\mu\text{m}$, $W_2=5.57a=3.0635\text{ }\mu\text{m}$ 。在 g_1 和 G_1 之间加入角度约为 10.2° 的锥形渐变波导, G_1 和 G_2 之间的锥形渐变波导角度大概为 10.1° 。 g_1 、 G_1 、 G_2 和2个锥形渐变波导组成主波导。模式转换区 p_{01} 的耦合长度 $L_1=14a$,模式转换区 p_{02} 的耦合长度 $L_2=17a$ 。

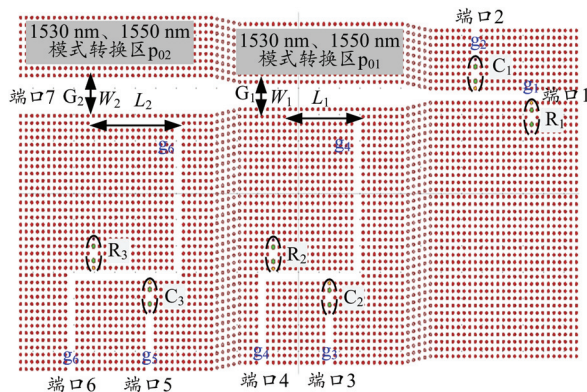


图1 基于光子晶体的2波长×3模式混合复用/解复用器结构图

图1中,所有组合谐振腔产生的缺陷模的波长为 1550 nm ^[8]。为了让光信号沿着主波导向左传输并且实现高效率的滤波,就端口2而言,设计了 R_1 部分,其结构与 C_1 完全相同, R_1 放置于主波导的另一侧。当输入的复用光波的谐振频率和 C_1 相同,光波被大部分下载到主波导,并向端口7传输,少部分光波传输到 R_1 后被反射回来沿着主波导从端口7输出。

1.2 波导宽度分析

本文设计的器件利用单模波导和多模波导构成了

非对称平行波导结构,从而可以达到模式转换的目的。在整个传输过程中,光波会持续不断地耦合进入到隔壁波导中,同时还会伴随着高阶模和基模之间的相互转换^[9,10]。以模式转换区 p_{01} 为例,复用时,在单模波导 g_4 中传输的基模 TE_0 持续耦合到多模波导 G_1 中,从而转化成一阶模 TE_1 。解复用时,在多模波导 G_1 中传输的一阶模 TE_1 持续耦合到单模波导 g_4 中,从而转换成基模 TE_0 。利用横向耦合模理论对该非对称平行波导结构进行研究^[11-13],2个耦合模的线性微分方程可以写为:

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -j\beta_1 A_1(z) + jc A_2 \quad (1)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -j\beta_2 A_2(z) + jc A_1 \quad (2)$$

其中, A_1 和 A_2 分别代表在单模波导和多模波导中传输的光波振幅; β_1 和 β_2 分别是单模波导和多模波导中的传播常数; c 是耦合系数且为常数。

经过推导可知,当 $\beta_1=\beta_2$ 时,波导中光信号的振幅可表示为:

$$A_1 = \cos(cz) e^{-j\beta_1 z} \quad (3)$$

$$A_2 = j \sin(cz) e^{-j\beta_2 z} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知,单模波导中传输的光功率能够与多模波导中传输的光功率完全耦合。

经过上述分析可知,要实现完全周期性的耦合,传播常数是关键。当多模波导 G_1 的宽度 $W_1=3.796a=2.0878\text{ }\mu\text{m}$ 时,仿真所得模式转换区 p_{01} 的传播常数 β ($2\pi/a$)曲线图如图2所示。曲线2代表在单模波导 g_4 中传输的 TE_0 模;曲线1和曲线3分别代表在多模波导 G_1 中传输的 TE_0 模和 TE_1 模。从图2可以看出,曲线2和曲线3相交,且相交处较为平坦。 1550 nm (归一化频率 $a/\lambda=0.355$)的光波在曲线2中的 β 和在曲

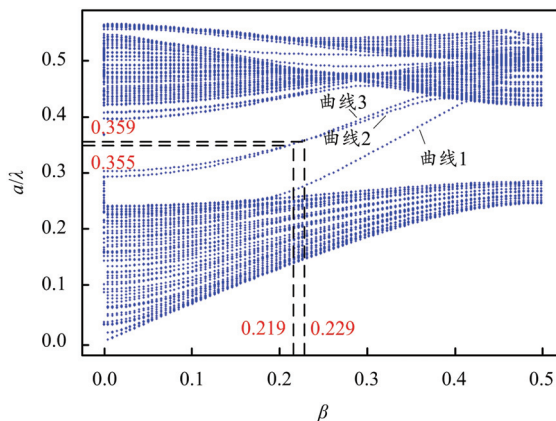


图2 单模波导 g_4 与多模波导 G_1 的传播常数 β 曲线图

线3中的 β 均为0.219;1530 nm($a/\lambda=0.359$)的光波在曲线2中的 β 和在曲线3的 β 均为0.229。因此,在模式转化区 p_{01} 中,能够实现 TE_0 模向 TE_1 模的转换,通过选择合适的耦合长度,使得耦合效率达到最高。

当多模波导 G_2 的宽度为 $W_2=5.57a=3.0635\ \mu\text{m}$ 时,仿真所得模式转换区 p_{02} 的传播常数曲线图如图3所示。曲线3代表在单模波导 g_6 中传输的 TE_0 模,曲线1、曲线2和曲线4分别代表在多模波导 G_2 中传输的 TE_0 模、 TE_1 模和 TE_2 模。从图3可以看出,曲线3和曲线4相交,且相交处较为平坦。1550 nm($a/\lambda=0.355$)的光波在曲线3中的 β 和在曲线4中的 β 均为0.219;1530 nm($a/\lambda=0.359$)的光波在曲线3中的 β 和在曲线4中的 β 均为0.229。因此,在模式转换区 p_{02} 中,能够实现 TE_0 模向 TE_2 模的转换,均通过选择合适的耦合长度,使得耦合效率达到最高。

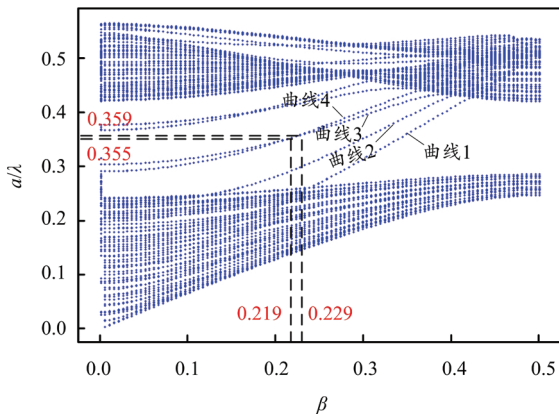


图3 单模波导 g_6 与多模波导 G_2 的传播常数曲线

1.3 复用/解复用过程

复用时,1530 nm的 TE_0 模从端口1输入,接着从端口7输出;1530 nm的 TE_0 模从端口4输入,转换成相应的1530 nm的 TE_1 模,最后从端口7输出;1530 nm的 TE_0 模从端口6输入,转换成相应的1530 nm的 TE_2 模,最后从端口7输出;1550 nm的 TE_0 模从端口2输入,接着从端口7输出;1550 nm的 TE_0 模从端口3输入,转换成相应的1550 nm的 TE_1 模,最后从端口7输出;1550 nm的 TE_0 模从端口5输入,转换成相应的1550 nm的 TE_2 模,最后从端口7输出。整个过程实现了2波长×3模式的波分-模分混合复用。

解复用时,1530 nm的 TE_0 模从端口7输入,接着从端口1输出;1530 nm的 TE_1 模从端口7输入,转换成相应的1530 nm的 TE_0 模,最后从端口4输出;1530 nm的 TE_2 模从端口7输入,转换成相应的1530 nm的 TE_0 模,最后从端口6输出;1550 nm的 TE_0 模从端

口7输入,接着从端口2输出;1550 nm的 TE_1 模从端口7输入,转换成相应的1550 nm的 TE_0 模,最后从端口3输出;1550 nm的 TE_2 模从端口7输入,转换成相应的1550 nm的 TE_0 模,最后从端口5输出。整个过程实现了2波长×3模式的波分-模分混合解复用。

2 仿真结果与性能分析

混合复用/解复用器的重要性能参数是插入损耗和信道串扰。插入损耗 γ 为:

$$\gamma = 10 \lg(I_{\text{in}}/I_{\text{out}}) \quad (5)$$

其中, I_{in} 和 I_{out} 分别是传输信道的输入和输出光强。

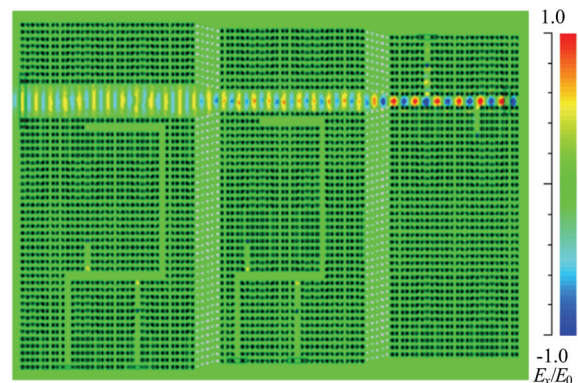
信道串扰 C 为:

$$C = 10 \lg(I'_{\text{out}}/I_{\text{out}}) \quad (6)$$

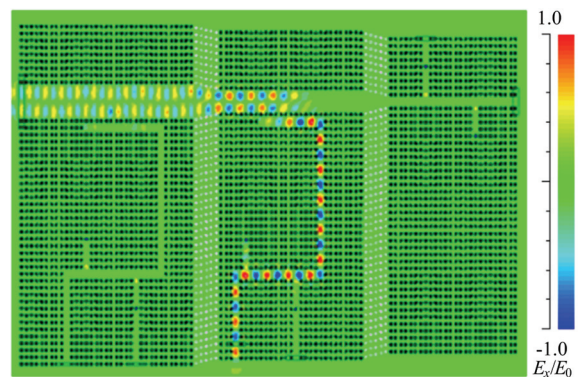
其中, I'_{out} 为传输信道进入相邻信道的光强。

2.1 复用性能分析

本文对所设计的器件采用时域有限差分法(FDTD)算法进行模拟分析。按1.3节的复用过程,在相应端口得到输出光强,并利用探测器测得信号传输到其它剩余端口的光强,得到6种稳态场强分布如图4所示,其中 E_x 是电场分量, E_0 是电场强度的最大值。从图4



(a) 1530 nm的 TE_0 模传输的稳态场强分布图



(b) 1530 nm的 TE_1 模传输的稳态场强分布图

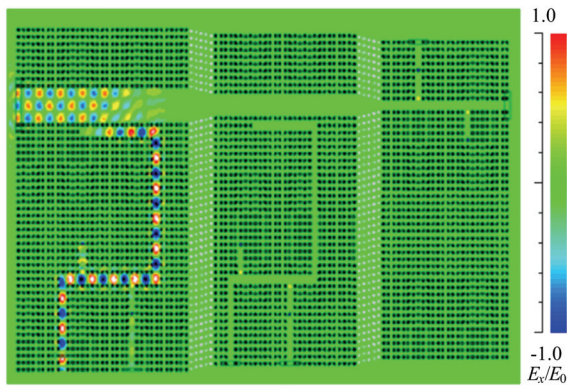
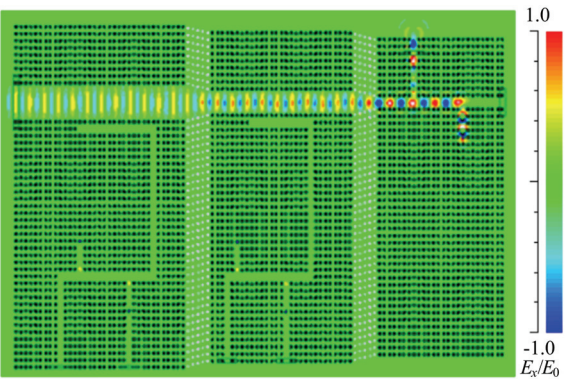
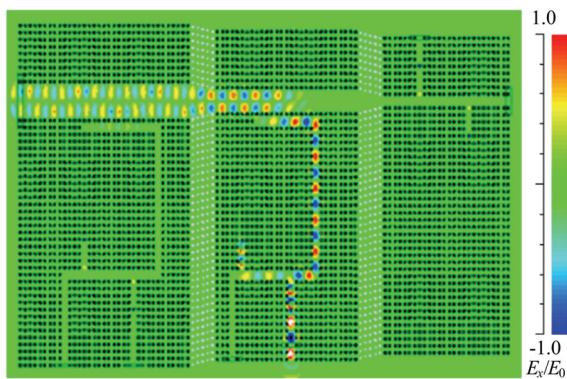
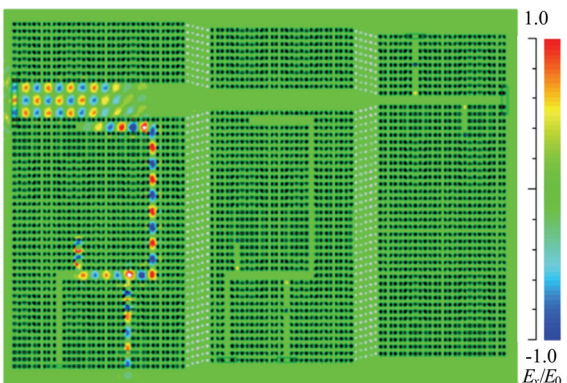
(c) 1530 nm 的 TE_2 模传输的稳态场强分布图(d) 1550 nm 的 TE_0 模传输的稳态场强分布图(e) 1550 nm 的 TE_1 模传输的稳态场强分布图(f) 1550 nm 的 TE_2 模传输的稳态场强分布图

图4 复用时稳态场强分布图

可以看出,复用时输入输出的端口关系满足1.3节的复用过程,信号从指定端口输入,能够转换成相应的模式从指定端口输出,表明该器件能很好地实现复用。

仿真中检测到复用时1530 nm和1550 nm的 TE_0 模、 TE_1 模和 TE_2 模在端口7输出的光强,以及输出到其它端口的光强,利用式(5)计算插入损耗,结果如表1所示。利用式(6)计算信道串扰,结果如表2所示。

表1 复用时1530 nm和1550 nm的
 TE_0 模、 TE_1 模和 TE_2 模的插入损耗

传输光波	插入损耗/dB	传输光波	插入损耗/dB
1530 nm TE_0	0.104	1550 nm TE_0	0.064
1530 nm TE_1	0.127	1550 nm TE_1	0.044
1530 nm TE_2	0.060	1550 nm TE_2	0.006

表2 复用时1530 nm和1550 nm的
 TE_0 模、 TE_1 模和 TE_2 模的信道串扰

传输光波	单模波导 $g_1 \sim g_6$ 的信道串扰/dB					
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
1530 nm TE_0	—	-17.30	-62.22	-47.96	-48.25	-30.41
1530 nm TE_1	-46.82	-58.82	-21.30	—	-47.90	-32.39
1530 nm TE_2	-30.47	-47.01	-50.40	-33.67	-16.04	—
1550 nm TE_0	-18.87	—	-33.19	-46.60	-32.28	-58.40
1550 nm TE_1	-50.81	-32.43	—	-19.79	-31.23	-65.46
1550 nm TE_2	-46.00	-31.14	-30.59	-49.53	—	-32.51

由表1和表2可以看出,复用时,器件的插入损耗均低于0.127 dB,信道串扰均小于-16.04 dB,复用性能良好。

2.2 解复用性能分析

解复用是复用的逆过程,本文不再赘述。由仿真可以检测到解复用时1530 nm和1550 nm的 TE_0 模、 TE_1 模和 TE_2 模的输出光强,以及输出到其它端口的输出光强,利用式(5)计算插入损耗如表3所示。利用式(6)计算信道串扰如表4所示。

由表3和表4可以看出,解复用时,器件的插入

刘莲香,陈鹤鸣:基于光子晶体的2波长×3模式混合复用/解复用器研究

表3 解复用时1530 nm和1550 nm的
TE₀模、TE₁模和TE₂模的插入损耗

传输光波	插入损耗/dB	传输光波	插入损耗/dB
1530 nm TE ₀	0.058	1550 nm TE ₀	0.002
1530 nm TE ₁	0.088	1550 nm TE ₁	0.004
1530 nm TE ₂	0.041	1550 nm TE ₂	0.067

表4 解复用时1530 nm和1550 nm的
TE₀模、TE₁模和TE₂模的信道串扰

传输光波	单模波导g ₁ ~g ₆ 的信道串扰/dB					
	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄	g ₅	g ₆
1530 nm TE ₀	—	-16.17	-43.83	-26.56	-46.60	-30.23
1530 nm TE ₁	-24.55	-37.68	-16.98	—	-42.30	-20.42
1530 nm TE ₂	-18.05	-34.22	-39.97	-23.62	-17.69	—
1550 nm TE ₀	-19.60	—	-28.24	-50.43	-29.07	-50.74
1550 nm TE ₁	-41.25	-29.15	—	-19.89	-21.61	-59.81
1550 nm TE ₂	-34.87	-15.19	-21.25	-43.59	—	-28.27

损耗均低于0.088 dB,信道串扰均小于-15.19 dB,解复用性能良好。

3 结束语

本文设计了一种基于光子晶体的2波长×3模式的6个信道混合复用/解复用器,在光子晶体中引入组合谐振腔和波长选择反射微腔,可以让1550 nm的光波实现高效率滤波;引入2对非对称平行波导,实现1530 nm和1550 nm的光波的TE₀模到TE₁模、TE₂模的模式转换。该器件能实现1530 nm TE₀模、1530 nm TE₁模、1530 nm TE₂模、1550 nm TE₀模、1550 nm TE₁模和1550 nm TE₂模的6个信道信号的复用和解复

用,插入损耗低,信道串扰小,尺寸约为27 μm×55 μm。本文的设计对于大幅度提高通信容量具有重要研究价值。

参考文献:

- [1] 汤艺超. 波分复用技术的应用现状与发展前景 [J]. 信息通信, 2013, (5): 192-192.
- [2] 涂超然. 多维复用传输系统的关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [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] RASRAS M, MULUGETA T. Silicon hybrid (de)multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing [J]. Optics Express, 2015, 23(2): 943-949.
- [5] NAWWAR O M, SHALABY H M H, POKHAREL R K. Photonic crystal-based compact hybrid WDM/MDM (De)multiplexer for SOI platforms [J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4176-4179.
- [6] 柳璐,陈鹤鸣. 波分-模分复用/解复用器的设计和性能分析[J]. 光通信研究, 2018, 44(3): 32-35.
- [7] 张通,孙晶,杨运兴. 光子晶体波分复用器的设计[J]. 光通信技术, 2018, 42(3): 33-35.
- [8] VENKATACHALAM K, KUMAR D S, ROBINSON S. Performance analysis of 2D-photonic crystal based eight channel wavelength division demultiplexer [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(20): 8819-8826.
- [9] 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.
- [10] WANG J, XUAN Y, QI M, et al. Broadband and fabrication-tolerant on-chip scalable mode-division multiplexing based on mode-evolution counter-tapered couplers[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 1956-1959.
- [11] 季珂,陈鹤鸣. 光子晶体粗波分—模分混合复用/解复用器[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(1): 50-59.
- [12] 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.
- [13] RIESEN N, LOVE J D. Tapered Velocity Mode-Selective Couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2163-2169.

2020年征订启事

光通信技术

月刊

邮发代号: 48-126

定 价: 16元/册;192元/年

订 阅: 全国各地邮局

为增强读者的阅读舒适感,从2019年起,《光通信技术》全刊采用铜板纸彩色印刷。