

基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究

孙 兵¹ 陈明阳¹ 钱春霖¹ 王 涛¹ 张永康²

(¹ 江苏大学机械学院, 江苏 镇江 212013)
(² 东南大学机械学院, 江苏 南京 211189)

摘要 提出了一种基于三芯光子晶体光纤的定向耦合器。通过增大纤芯两侧空气孔直径来引入非对称纤芯, 该方法有效地实现了 1×3 分束的目的。数值分析表明, 该三芯光子晶体光纤定向耦合器的工作带宽可达 113.9 nm (具体为波长从 1530.9~1644.8 nm) 且均匀性小于 0.4 dB、偏振相关损耗低于 0.2 dB。此外, 这种结构能够有较大的制作容差, 具体表现为器件长度在光纤长度 (20.9 mm) 的 $\pm 4\%$ 范围内变化都能保证工作带宽不小于 80 nm。

关键词 光纤光学; 定向耦合器; 光子晶体光纤; 三芯非对称结构; 偏振相关损耗; 均匀性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706010

Design of a Broadband Directional Coupler Based on an Asymmetric Three-Core Photonic Crystal Fiber

Sun Bing¹ Chen Mingyang¹ Qian Chunlin¹ Wang Tao¹ Zhang Yongkang²

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract A design for a novel broadband directional coupler (1×3) based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber (PCF) is proposed. The asymmetry core in the fiber is introduced by the enlargement of air holes in three-core PCF. Numerical investigations demonstrate that the operating wavelengths of the novel broadband coupler range from 1530.9 to 1644.8 nm. The uniformity is less than 0.4 dB and polarization-dependent loss is less than 0.2 dB. In addition, the proposed coupler shows large tolerance to the fiber parameters. In particular, the coupler with at least $\pm 4\%$ derivation of the fiber length (20.9 mm) can ensure that the work bandwidth is not less than 80 nm.

Key words fiber optics; directional coupler; photonic crystal fiber; three-core asymmetry core; polarization-dependent loss; uniformity

OCIS codes 060.1810; 060.4005; 060.4252; 060.4510; 060.5295

1 引 言

光纤及光波导定向耦合器作为一种重要的光学器件在光纤通信、有线电视网路、用户回路系统和区域网路等系统中应用十分广泛。基于 Y 型结构或者 T 型结构的 1×2 光分束器件的相关技术已经比较成熟, 但由于结构的特殊性, 1×3 光分束器在均匀性、带宽等方面还有待提高。近几年来, 光子晶体

光纤(PCF)^[1]由于其结构设计上的灵活性等特点而被广泛的研究。人们已经提出多种基于光子晶体光纤的耦合器件, 这其中主要是指双芯光子晶体光纤器件^[2-3], 它们已经被广泛应用于偏振分束器^[4-8], 波分复用元件^[9-11]、滤波器^[12]、色散补偿^[13]等器件中。基于光子晶体光纤结构的定向耦合器也有人提出。例如, 通过在双芯光子晶体光纤中引入非对称

收稿日期: 2013-01-30; **收到修改稿日期**: 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(10904051)、江苏省博士研究生创新项目(CXZZ11_0547)、江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师

作者简介: 孙 兵(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤技术和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: graduate_sunbing@163.com

导师简介: 陈明阳(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光波导和光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: miniyong@163.com

结构(通过增大纤芯两侧空气孔直径的方法),可以获得带宽为 370 nm、偏振相关损耗小于 0.2 dB 的新型定向耦合器^[14]。此外,基于三芯光子晶体光纤的耦合器件也一直受到研究人员的关注。目前也将三芯光子晶体光纤用于实现偏振分束器件^[6,15]、滤波器^[16]等方面的报道。然而,1×3 结构定向耦合器的研究却很少见于报道^[17]。这主要是因为要在比较宽的工作波长范围内实现 1×3 均匀分光是比较困难的。

本文提出一种新型的 1×3 耦合器的设计方法。通过引入非对称三芯光子晶体光纤结构,使得该耦合器可以在较宽的带宽范围内达到 1×3 分束的目的。数值模拟分析表明,这种耦合器的工作波长可以达到 113.9 nm,且此时的偏振相关损耗低于 0.2 dB。

2 数值研究

图 1 给出了该新型三芯光子晶体光纤的横截面示意图。图中灰色区域表示纯石英,深色区域表示空气孔。空气孔的周期为 Λ ,除水平方向上两侧直径增大的空气孔 d_s 外,其他空气孔的直径均为 d 。纤芯外层空气孔的主要作用是对纤芯中的模式起束缚作用。由于两侧空气孔直径的改变形成了两个非对称纤芯,因而该结构由一个对称纤芯和两个非对称的纤芯构成。通过 d_s 来调整左右两侧纤芯的模式有效折射率,使其与中间纤芯在较宽的频率范围内实现相位部分匹配,最终实现了能量的部分耦合^[7]。光纤背景材料二氧化硅的折射率参数设置为 $n=1.45$,为简单起见,忽略其色散特性。

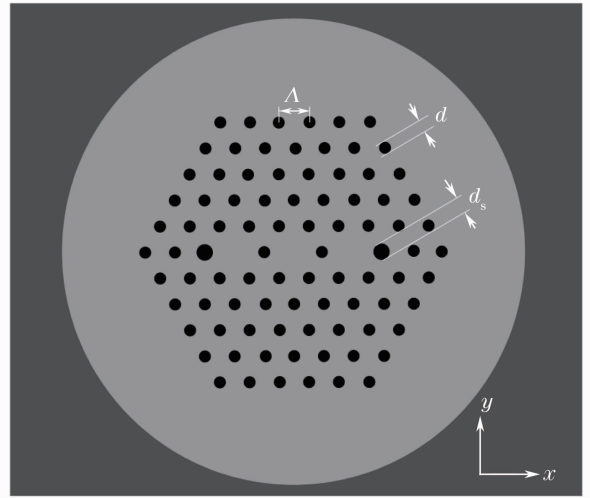


图 1 新型三芯光子晶体光纤耦合器的横截面示意图
Fig. 1 Cross-section of the proposed three-core photonic crystal fiber

采用基于透明边界条件的虚轴光束传播法分析该耦合器的相关传输特性。在数值计算时, x 、 y 面上的计算区域为 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$,其离散化网格尺寸为 $\Delta x = \Delta y = 0.17 \mu\text{m}$, $\Delta z = 5 \mu\text{m}$ 。这里取孔周期为 $\Lambda = 10 \mu\text{m}$,光波长为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。图 2(a)给出了包层空气孔直径相等($d/\Lambda = d_s/\Lambda = 0.43$)时的能量传输曲线。从图中可以看出,当取光纤长度为 15.86 mm 左右时,三个纤芯的输出能量大致相等,但其两个偏振方向在各个纤芯输出能量相等位置处能量曲线比较陡,也即斜率比较大,后面分析发现这种结构的性能较差。图 2(b)给出了包层空气孔取为 $d/\Lambda = 0.43$, $d_s/\Lambda = 0.48$ 时的能量传输特性曲线。由图可见,采用这种结构,从中间纤芯输入的能量只有部分耦合到两侧纤芯。显然,此时能量输出

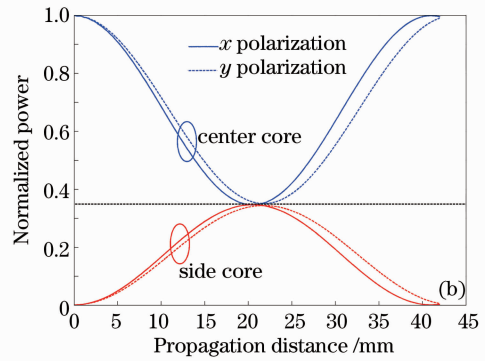
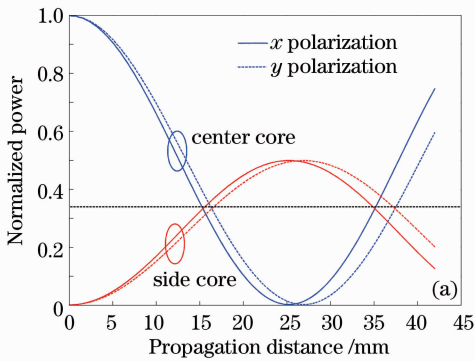


图 2 中间纤芯和两侧纤芯的能量传输曲线。(a) $d/\Lambda = d_s/\Lambda = 0.43$; (b) $d/\Lambda = 0.43$, $d_s/\Lambda = 0.48$

Fig. 2 Power transfer curves of center core and side core. (a) $d/\Lambda = d_s/\Lambda = 0.43$;
(b) $d/\Lambda = 0.43$, $d_s/\Lambda = 0.48$

端适合选在能量曲线斜率接近于零(即其耦合长度变化比较平缓)的位置。这样,由于斜率值小,光纤实际长度偏离设计长度时,仍然可以保证其输出具有较好的均匀性。由光束传播法计算得到该非对称三芯光子晶体耦合器在 x 偏振和 y 偏振方向上的耦合长度

分别为 20.4 mm 和 21.4 mm。图 3 给出当光纤长度取为 $L=20.9$ mm(两偏振方向耦合长度的平均值)时的模式转换过程。由中间纤芯输入一束基模[如图 3(a)所示],逐渐向两侧纤芯转移[如图 3(b)、(c)所示],最终能量完全均分在三个纤芯中[如图 3(d)]。

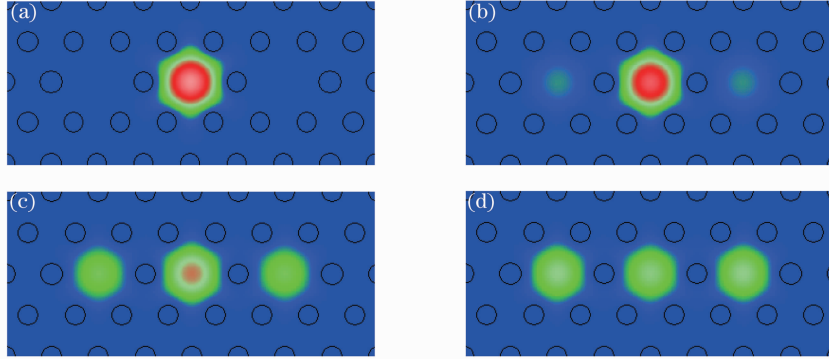


图 3 非对称结构三芯光子晶体光纤耦合器在 (a) $z=0$; (b) $z=L/3$; (c) $z=2L/3$; (d) $z=L$ 时的场分布

Fig. 3 Field distributions at (a) $z=0$; (b) $z=L/3$; (c) $z=2L/3$; (d) $z=L$ of asymmetric three core PCF coupler

这里,定义插入损耗为纤芯输出端能量与输入端能量之比,单位为 dB。在理想情况下, 1×3 分束器的插入损耗为 4.7 dB,若从三个纤芯输出的光束功率不同,则其插入损耗会增大。同时要求三个纤芯的输出功率的均匀性小于 0.4 dB,即三个纤芯的插入损耗值应在 (4.7 ± 0.2) dB 范围内。此外,还定义偏振相关损耗为 x 偏振方向和 y 偏振方向插入损耗的差值,并要求偏振相关损耗小于 0.2 dB。图 4 给出了当光纤长度为 20.9 mm 时该非对称三芯光子晶体光纤耦合器的插入损耗随着波长变化关系曲线。由图可见,中间纤芯和两侧纤芯的插入损耗在 (4.7 ± 0.2) dB 内,且其偏振相关损耗均小于 0.2 dB 的前提下,其工作波长范围为 1530.9~1644.8 nm,即其工作带宽可达 113.9 nm。此外,还考虑了光纤取不同长度时的插入损耗及偏振相关损耗,如图 5 所示。

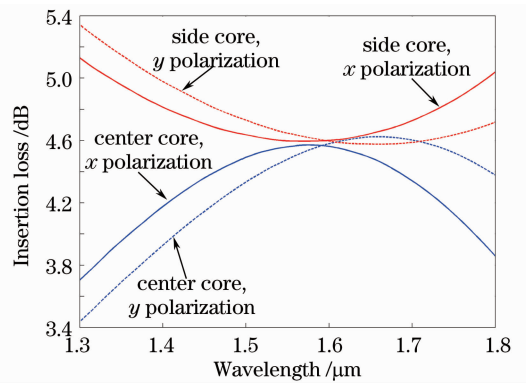


图 4 光纤长度为 20.9 mm 时,该耦合器的插入损耗随波长的关系

Fig. 4 Insertion losses of the proposed coupler as a function of wavelength with fiber length of 20.9 mm

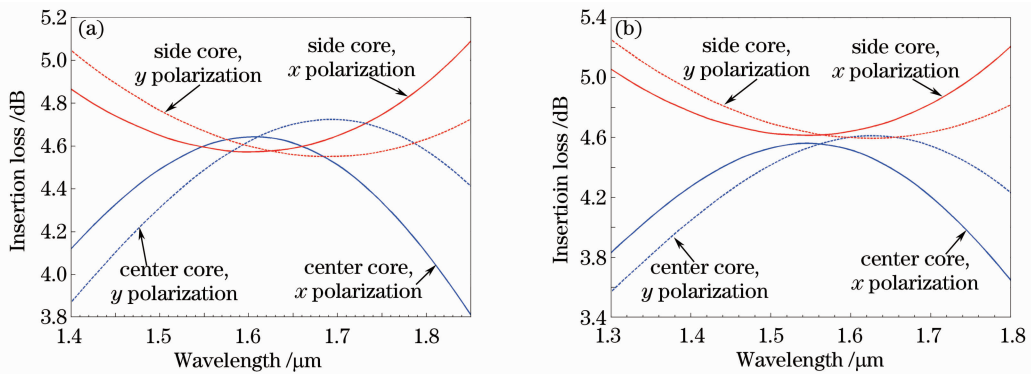


图 5 该耦合器的插入损耗随波长的关系。光纤长度分别为(a) 20.4 mm 和(b) 21.4 mm

Fig. 5 Insertion losses of the proposed coupler as a function of wavelength with fiber length of (a) 20.4 mm and (b) 21.4 mm

从图 5(a)可以看到,当 $L=20.4$ mm,两偏振态的插入损耗均在 (4.7 ± 0.2) dB 之间时,其工作波长范围为 $1553.6 \sim 1704.3$ nm 且相关偏振损耗小于 0.2 dB。如图 5(b)所示,当光纤长度为 $L=21.4$ mm,两偏振态的插入损耗均在 (4.7 ± 0.2) dB 之间时,其工作波长范围为 $1531.7 \sim 1609.7$ nm,且相关偏振损耗小于 0.2 dB。可见,当光纤长度偏离平均值时,会导致工作波长向长波长(光纤长度变短时)或向短波长(光纤长度变长时)方向移动且工作带宽也会有所变化。由以上分析可见,光纤长度产生 0.5 mm 的偏差时,其工作带宽均能达到 80 nm 以上。还分析了两侧非对称空气孔的变化情况,发现当其直径减小 15 nm 时,该定向耦合器的工作波长范围仍然具有宽带工作的特点。因此,这种结构具有较大的制作容差。

3 讨 论

上面分析了两种三芯光子晶体光纤定向耦合器:一种对称结构和一种非对称结构。尽管两种结构均能实现 1×3 分束,但两者的工作带宽差别很大。图 6 给出了对称三芯结构的插入损耗。这里取光纤的长度为两个偏振方向耦合长度的平均值,也即 15.86 mm,其中 x 方向的耦合长度为 15.36 mm, y 方向的耦合长度为 16.36 mm。由图可见,当要求插入损耗在 (4.7 ± 0.2) dB 之间,且其偏振相关损耗小于 0.2 dB 时其工作带宽为零。其主要原因是,能量输出出现在耦合曲线斜率最大的位置,此时,光纤参数变化对光纤耦合长度及能量输出的影响是最大的。从图 7(a)也可以反映出

这一点(图中的直线表示工作在 1550 nm 波长处光纤长度所在的位置)。图 7(a)给出了这种对称结构三芯耦合器不同输入波长时的纤芯能量变化曲线。由图可见,波长变化对能量输出影响很大。因此,很难获得偏振相关损耗小同时均匀性又好的输出特性。而波长变化时,非对称三芯光子晶体光纤耦合器的能量输出在耦合长度附近的变化较小,从图 7(b)可以看出这一点[注意 1550 nm 波长处光纤长度所在的位置(实线表示)]。因此,虽然两种结构下,波长的红移或蓝移都会导致耦合长度变长或变短,从而影响器件的插入损耗或偏振相关损耗。但非对称结构下,由于能量输出位置是在耦合能量曲线斜率最小的区域,因此,波长变化对其输出能量影响较小。这就是其工作带宽会很宽的原因。

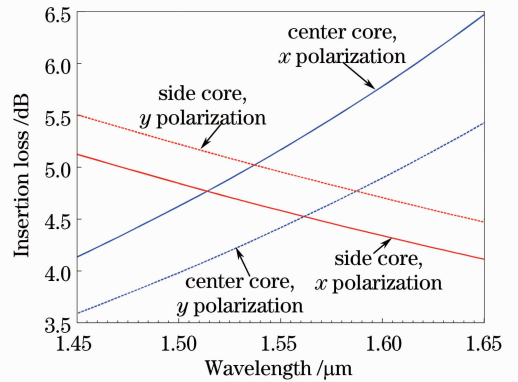


图 6 光纤长度为 15.86 mm 时,普通对称结构光子晶体光纤耦合器的插入损耗随波长的关系
Fig. 6 Insertion losses of the normal symmetric PCF coupler as a function of wavelength with fiber length $L=15.86$ mm

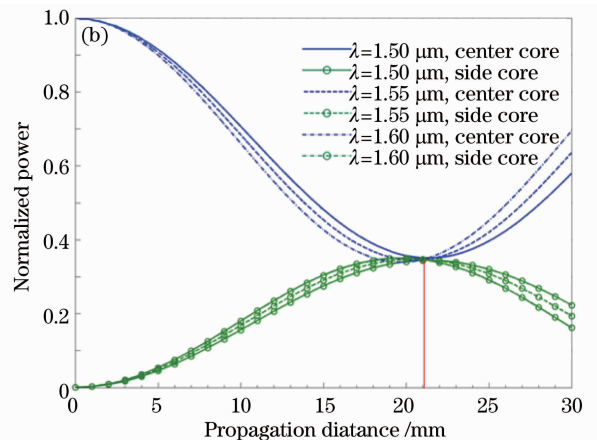
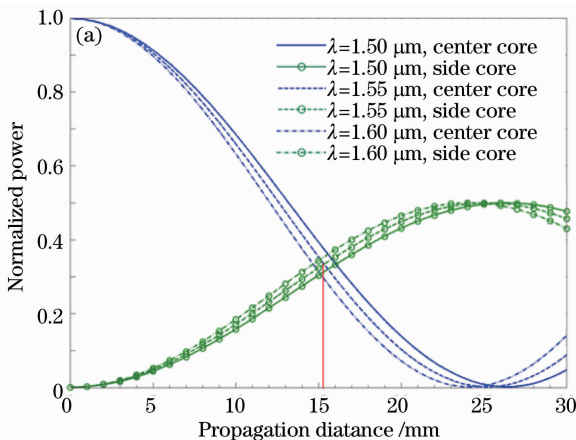


图 7 不同波长下的能量传输曲线。(a)对称结构;(b)非对称结构

Fig. 7 Power transfer curves under different wavelengths. (a) Symmetric; (b) asymmetric

由于纤芯之间距离较近,在实际应用时,仍需要通过一定手段实现三芯耦合器与普通光纤的有效连

接。Leon-Saval 等^[18]曾提出一种光子晶体光纤与普通光纤的低损耗连接方法,即通过一锥形过渡区

将单模光纤与三芯光子晶体光纤的纤芯连接起来，通过渐变式的折射率变化实现光的有效输入与输出。本文所提出的三芯定向耦合器同样可以采用这种方法来实现。

4 结 论

提出了一种基于非对称三芯光子晶体光纤结构的宽带耦合器。通过对两侧纤芯的包层空气孔直径做调整，可以在宽带宽、低插入损耗的前提下实现能量均分在三个纤芯中。同时分析了光纤长度及包层空气孔直径对耦合器性能的影响，研究表明这种耦合器件允许有较大的容差，为实际制作这种器件提供了便利。

参 考 文 献

- Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961-963.
- Wang Liwen, Lou Shuqin, Chen Weiguo, *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber for broadband and polarization-insensitive coupler [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0605008.
王立文, 娄淑琴, 陈卫国, 等. 用于宽带偏振无关耦合器的双芯光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605008.
- Li Dan, Liu Min, Jian Duo, *et al.*. Characteristics of highly birefringent dual-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405005.
李 丹, 刘 敏, 简 多, 等. 高双折射双芯光子晶体光纤特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405005.
- Zhang L, Yang C. A novel polarization splitter based on the photonic crystal fiber with nonidentical dual cores [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2004, 16(7): 1670-1672.
- Zhang L, Yang C, Yu C, *et al.*. PCF-based polarization splitters with simplified structures [J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(11): 3558-3565.
- Rosa L, Poli F, Foroni M, *et al.*. Polarization splitter based on a square-lattice photonic-crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 441-443.
- Chen M Y, Sun B, Zhang Y K, *et al.*. Design of broadband polarization splitter based on partial coupling in square-lattice photonic-crystal fiber [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(16): 3042-3048.
- Li J, Mao Y, Lu C, *et al.*. Polarization splitting of photonic crystal fiber with hybrid guidance mechanisms [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 23(18): 1358-1360.
- Saitoh K, Sato Y, Koshihara M. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber couplers [J]. *Opt Express*, 2003, 11(24): 3188-3195.
- Florous N, Saitoh K, Koshihara M. A novel approach for designing photonic crystal fiber splitters with polarization-independent propagation characteristics [J]. *Opt Express*, 2005, 13(19): 7365-7373.
- Chen M Y, Zhou J. Polarization-independent splitter based on all-solid silica-based photonic-crystal fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(12): 5082-5086.
- Sun X. Wavelength-selective coupling of dual-core photonic crystal fiber with a hybrid light-guiding mechanism [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17): 2484-2486.
- Ma Lingfang, Liu Min, Li Dan, *et al.*. A kind of hollow dual-core photonic crystal fiber with zero inter-modal dispersion [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0805006.
马玲芳, 刘 敏, 李 丹, 等. 零模间色散双芯光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0805006.
- Chen Mingyang, Zhang Yongkang, Zhu Yuanfeng, *et al.*. Broadband directional coupler based on asymmetric dual-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 635-639.
陈明阳, 张永康, 祝远锋, 等. 基于非对称双芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 635-639.
- Saitoh K, Sato Y, Koshihara M. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers [J]. *Opt Express*, 2004, 12(17): 3940-3946.
- Saitoh K, Florous N J, Koshihara M. Design of narrow band-pass filters based on the resonant-tunneling phenomenon in multi-core photonic crystal fibers [J]. *Opt Express*, 2005, 13(25): 10327-10335.
- Takagi A, Jinguji K, Kawachi M. Design and fabrication of silica-based waveguide-type (3×3) directional couplers with two identical outer waveguides [J]. *Jpn J Appl Phys*, 1992, 31(part 1): 1618-1627.
- Leon-Saval S G, Birks T A, George N Y, *et al.*. Splice-free interfacing of photonic crystal fibers [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(13): 1629-1631.

栏目编辑：王晓琰