

三根平行微纳光纤耦合特性研究

曾燕¹ 章玲¹ 周爱² 陈国庆¹

(¹ 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122
² 哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 微纳光纤具有大比例倏逝场传输的光学特性, 相比于普通光纤, 其耦合现象更加明显。利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件对三根平行微纳光纤进行了详细的数值模拟研究。计算结果表明, 纤芯间距改变时, 三根平行微纳光纤随传输距离变化的功率耦合分布的规律是相似的, 都呈周期性分布。纤芯间距不同时, 耦合周期发生变化, 且随着纤芯间距的增大, 耦合周期也逐渐增大。且入射光的偏振态对耦合周期和耦合效率也有一定的影响。利用三根平行微纳光纤的耦合特性, 设计了一种 3×1 微纳光纤耦合器, 当选取恰当的纤芯间距和耦合区长度时, 3×1 微纳光纤耦合器的耦合效率最高可达 93.3%。

关键词 光纤光学; 微纳光纤; 耦合特性; 耦合器; 倏逝场

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905003

Investigation of Coupling Characteristics among Three Parallel Micro/Nano Optical Fibers

Zeng Yan¹ Zhang Ling¹ Zhou Ai² Chen Guoqing¹

(¹ School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China
² School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Micro/nano optical fibers have the optical property of large evanescent fields, which makes their coupling phenomenon more obvious compared with the normal optical fibers. The simulation of three parallel micro/nano optical fibers is performed by using the software of COMSOL Multiphysics which is on the basis of the finite element method. The results show that the coupling power distributions are approximation as the transmission distance changing when the distance between parallel micro/nano optical fibers is changed. The distributions are periodical and coupling periods increase when the distances increase. The polarization of incident light has an influence on coupling period and coupling efficiency. By utilizing the coupling characteristics among three parallel micro/nano optical fibers, a 3×1 micro/nano optical fiber coupler is designed and its coupling efficiency is approximately 93.3% when the appropriate coupling length and distances between the optical fibers are chosen.

Key words optical fiber optics; micro/nano optical fibers; coupling characteristics; coupler; evanescent fields

OCIS codes 060.2270; 060.2310; 060.2430; 230.3990

1 引言

近年来, 由于微纳光纤具有小尺寸、大比例倏逝场传输、强光场约束、低光学损耗和高耦合效率等优点^[1], 使微纳光纤的研究成为热点。利用微纳光纤

这些优点, 微纳尺度的光子器件, 如传感器^[2-9]、耦合器^[10-12]、滤波器^[13]、激光器^[14]、光纤光栅^[15]和环形谐振器^[16-19]等, 也相继被研究出来。微纳光纤大比例倏逝场传输的光学特性, 使它相比于普通光纤,

收稿日期: 2014-03-21; 收到修改稿日期: 2014-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(11204047)

作者简介: 曾燕(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事微纳光纤和光电器件等方面的研究。E-mail: zengyan2521@163.com

导师简介: 陈国庆(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电器件和光谱学等方面的研究。

E-mail: cgq2098@163.com(通信联系人)

更容易发生耦合,因此,倏逝场耦合在这些微纳光子器件的研究中是非常重要的,因此对微纳光纤间的耦合特性进行研究也十分必要。以往对微纳光纤间耦合特性的研究大多集中在两根微纳光纤的情况下,且是单根微纳光纤入射光场^[20-21];而在多根微纳光纤同时入射光场时,对它们之间的耦合特性的详细的研究却比较少见。

基于此,本文利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件对三根平行微纳光纤进行了数值模拟研究,得到了它们之间的耦合特性。同时,根据三根平行微纳光纤的耦合特性,设计了一种 3×1 微纳光纤耦合器,并讨论了该耦合器的耦合效率。

2 三根平行微纳光纤模型

三根微纳光纤平行放置在同一平面内,如图 1 所示。假定三根微纳光纤完全相同,为忽略光纤的边界效应,设光纤为无限长。纤芯为二氧化硅,其折射率 $n_c = 1.46$,光纤间的介质设为空气,也即为包层,其折射率 $n_0 = 1$ 。若取光纤纤芯直径为 D ,根据归一化频率^[1]:

$$V = \frac{\pi D}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_0^2}, \quad (1)$$

在入射波长 λ 为 $0.633 \mu\text{m}$ 时,为了使微纳光纤能单模传输,即 $V < 2.405$,其直径 $D < 0.456 \mu\text{m}$ 。又因为当微纳光纤的直径小于入射波长的十分之一时,光纤不能正常导光^[22],所以 $D > 0.1 \mu\text{m}$,为满足以上条件,模型中微纳光纤的直径取 $D = 0.35 \mu\text{m}$ 。三根微纳光纤从上至下被编号为光纤 1、光纤 2 和光纤 3,传输光沿 z 轴方向,横截面为 xy 平面。相邻两根微纳光纤纤芯间距 d 是一个变化量,将在第三部分被具体给出。另外,三根微纳光纤将同时入射功率为 $P_0 = 1 \text{ mW}$ 的光。

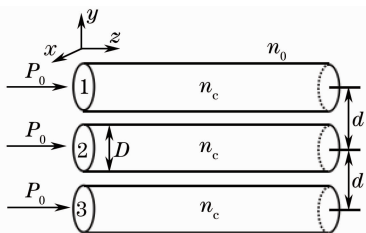


图 1 三根平行微纳光纤模型

Fig. 1 Model of three parallel micro/nano optical fibers

3 三根平行微纳光纤耦合特性

微纳光纤不同于普通光纤,它的纤芯与包层的折射率相差较大,用于分析普通单模光纤光学传输

特性的弱波导近似解不再适用,因而研究微纳光纤间的耦合特性只能通过直接精确求解麦克斯韦方程组。由于这个计算繁长复杂,因此借助有限元法是一个非常好的选择,其基本原理是将连续的求解域离散为一组单元的组合物^[23]。利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件来完成数值模拟。

在数值模拟中,纤芯间距分别取 $d = 0.35, 0.45, 0.55 \mu\text{m}$ 。由于微纳光纤之间的耦合与电磁场偏振方向有较大联系,根据图 1 的坐标轴和计算结构的对称性,分别计算了入射光为 x 偏振和 y 偏振的情况。以每根微纳光纤纤芯在同一传输距离束缚的光功率作比值,得到三根平行微纳光纤功率耦合分布如图 2 所示,实线和虚线分别表示入射光为 y 偏振的微纳光纤 2 和 1、3 的功率变化,方点实线和圆点实线分别表示入射光为 x 偏振的微纳光纤 2 和 1、3 的功率变化。结果显示,当入射光偏振态和纤芯间距不同时,三根平行微纳光纤随传输距离变化的功率耦合分布的规律是相似的,由于分布对称性,光纤 1 和 3 的功率变化曲线完全重合。在起始点,三根微纳光纤中的功率是一致的,随着光场的传输,光纤 1 和 3 中的功率逐渐被耦合到了光纤 2 中。当光纤 1 和 3 中的大部分功率耦合到光纤 2 后,由于微纳光纤具有大比例倏逝场传输的光学特性,因此倏逝场很强,在光纤 1 和 3 中也存在小部分功率。接着光纤 2 中的功率又耦合回光纤 1 和 3 中,直到光纤 2 中的大部分功率基本等量回到光纤 1 和 3 后,光纤 1 和 3 又开始重新向光纤 2 中耦合功率,这样完成一个耦合周期 L_T 。随着传输距离的增长,功率就在三根微纳光纤中发生如此周期性的耦合。入射光的偏振态对于耦合周期 L_T 有轻微的影响, x 偏振比 y 偏振入射情况的耦合周期 L_T 小 $0.2 \mu\text{m}$ 左右。

比较图 2 中的(a)~(c)可以看到,纤芯间距 d 不同时,耦合周期也不相同,并且随着纤芯间距 d 的增大,耦合周期也逐渐增大。这是由于随着纤芯间距 d 的增大,微纳光纤间的耦合系数会明显减小,因而微纳光纤间的耦合能力大大降低,能量转移的速率变慢,耦合周期也随之变大。

图 3 给出了一个耦合周期内三根微纳光纤的能量分布,其中(a)~(e)分别为 $z = 0, 0.25 L_T, 0.5 L_T, 0.75 L_T, L_T$ 时三根微纳光纤横截面上的能量分布。从图中可以看出,在 $z = 0$ 时,三根微纳光纤中束缚的能量相同,能量基本都聚集在纤芯中,并且中心最高,向外逐渐降低,但由于相邻两根微纳光纤紧邻处发生了耦合作用,导致附近的模场发生变

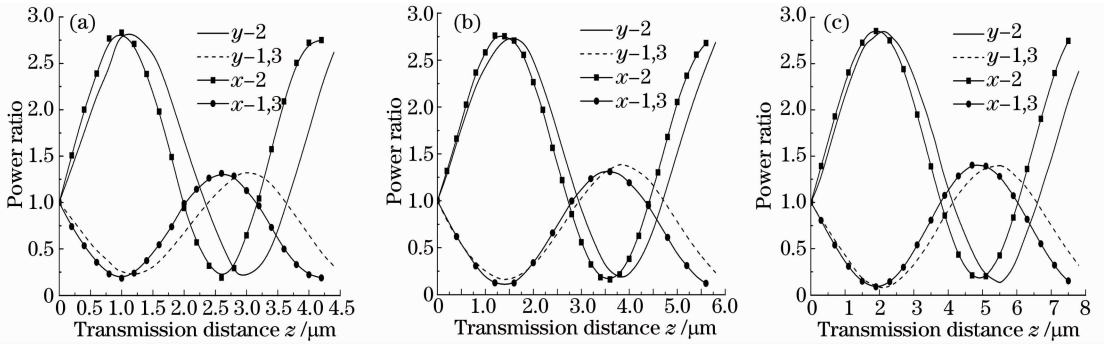


图 2 不同纤芯间距的功率耦合分布。(a) $d=0.35 \mu\text{m}$; (b) $d=0.45 \mu\text{m}$; (c) $d=0.55 \mu\text{m}$

Fig. 2 Power coupling distributions when fiber spacing is different. (a) $d=0.35 \mu\text{m}$; (b) $d=0.45 \mu\text{m}$; (c) $d=0.55 \mu\text{m}$

形,不再是圆弧状,而是向外突出。在 $z=0.25 L_T$ 时,能量基本都耦合到了光纤 2 中。在 $z=0.5 L_T$ 时,光纤 2 中的部分能量耦合回到光纤 1 和 3 中,三根微纳光纤中的能量分布基本相同。在 $z=0.75 L_T$ 时,光纤 2 中的能量基本上全部耦合到光纤 1 和 3 中,并且光纤 1 和 3 中的能量分布相同。在 $z=L_T$ 时,能量分布又均匀分布在三根光纤中,完成一个周期。

的间距 $d_0=4 \mu\text{m}$,能量分布互不影响,在基本不产生弯曲损耗的情况下,使两边的光纤 1 和 3 弯曲,使其越来越接近中间光纤 2,此区域的长度 L_0 为 $10.7 \mu\text{m}$ 。接着使光纤 1、3 与光纤 2 平行,这段平行区域称之为耦合区,长度为 L ,光纤 1、3 与光纤 2 的间距均为 d 。通过改变 d 和 L 的值,可将光纤 1 和 3 的能量很好地耦合到光纤 2 中。

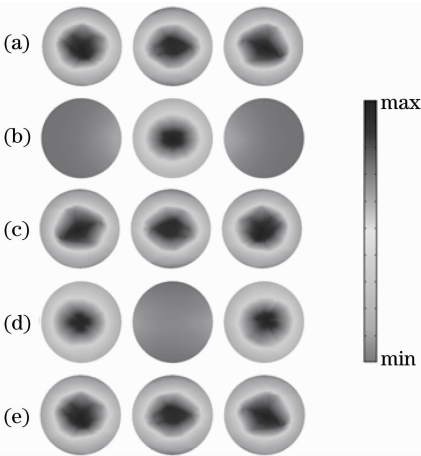


图 3 一个耦合周期内三根微纳光纤的能量分布。(a) $z=0$; (b) $z=0.25 L_T$; (c) $z=0.5 L_T$; (d) $z=0.75 L_T$; (e) $z=L_T$

Fig. 3 Energy distributions of three micro/nano optical fibers in a coupling period. (a) $z=0$; (b) $z=0.25 L_T$; (c) $z=0.5 L_T$; (d) $z=0.75 L_T$; (e) $z=L_T$

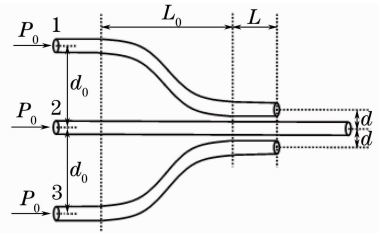


图 4 3×1 微纳光纤耦合器

Fig. 4 3×1 micro/nano optical fiber coupler

耦合效率 η 是评估光纤耦合器非常重要的一个参数,其计算公式定义为

$$\eta = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}, \quad (2)$$

式中 P_{output} 和 P_{input} 分别表示输出端与输入端的光功率。在此种 3×1 微纳光纤耦合器中,输入光功率为三根微纳光纤入射光功率之和。取三根微纳光纤的入射光功率均为 $P_0=1 \text{ mW}$,所以 $P_{\text{input}}=3 P_0=3 \text{ mW}$,入射光波长 $\lambda=0.633 \mu\text{m}$ 。

首先,设光纤的间距 $d=0.4 \mu\text{m}$,改变耦合区的长度 L ,入射光为 x 偏振和 y 偏振光时的耦合效率变化如图 5 所示。可以看到,随着 L 的改变,耦合效率 η 呈现周期性的变化,这是由三根平行微纳光纤的耦合特性所决定的。入射 x 偏振光时,耦合器在耦合区长度 L 最短为 $1.1 \mu\text{m}$ 时达到最佳耦合效率 η_{max} 为 87.4% 。入射 y 偏振光时,耦合效率要优于 x 偏振光, η_{max} 为 93.3% ,并且,达到最佳耦合效率 η_{max} 时,最短的耦合区长度 L 也只有 $1.3 \mu\text{m}$,由此可

4 3×1 微纳光纤耦合器

基于对三根平行微纳光纤耦合特性的研究,设计了一种 3×1 微纳光纤耦合器,模型如图 4 所示。三根微纳光纤与第二部分中给出的光纤参数完全相同,平行放置。在微纳光纤直径相同时,它们的传播常数是相等的,耦合效果最好。在起始点,相邻光纤

说明,若要获得更高的耦合效率,则需要对入射光的偏振态进行控制。该光纤耦合器在入射 y 偏振光时的能量分布如图 6 所示,图中颜色从灰到黑表示能量密度由低到高,可以看到,光纤 1 和 3 的能量很好地耦合到了光纤 2 中。

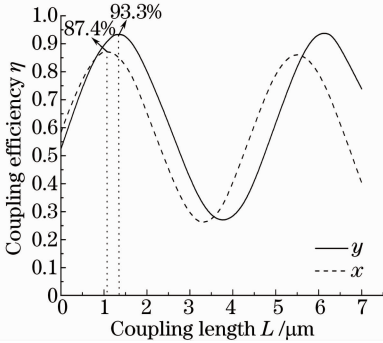


图 5 耦合效率随 L 变化

Fig. 5 Coupling efficiency variations as L changing

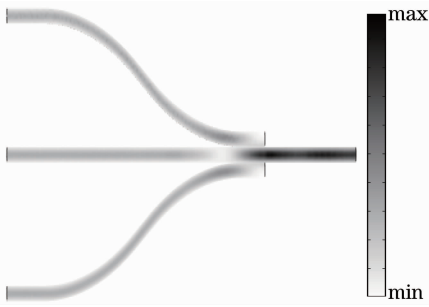


图 6 L 为 $1.3 \mu\text{m}$ 时的能量分布

Fig. 6 Energy distributions as $L=1.3 \mu\text{m}$

在 $d=0.4 \mu\text{m}$, $L=1.3 \mu\text{m}$, 入射 y 偏振光的基础上,改变入射波长 λ , 结果如图 7 所示,可以看到,随着入射波长 λ 的增大,耦合效率会先增大后减小,在 $600\sim 670 \text{ nm}$ 的入射波长区间内耦合效率 η 大于 80% 。并且,通过右上角的放大图可以看到,入射波长 λ 在 $630\sim 650 \text{ nm}$ 之间时,耦合效率 η 都大于 90% 。由此说明,此光纤耦合器不仅仅适合于单一波长,在某一波段范围内,均有很好的耦合效率。

由以上结果可知,通过改变在此种 3×1 微纳光纤耦合器中所用微纳光纤的参数 n_c 、 n_0 、 D , 特别是纤芯间距 d 和耦合区的长度 L , 可以设计出适用于不同用途的 3×1 微纳光纤耦合器。

光纤耦合器是光纤系统中一种非常重要的光无源器件^[24-25]。在光学领域,一束光分成多束比较容易,而将多束光合成一束,则较具挑战性。本文中所设计的 3×1 微纳光纤耦合器的长度只有十几微米,比普通光纤耦合器的尺寸小几个数量级,实现了三束光合成一束的功能,并且耦合效率大于 90% 。由此说明,由此方法,可以设计出拥有较高耦合效率的

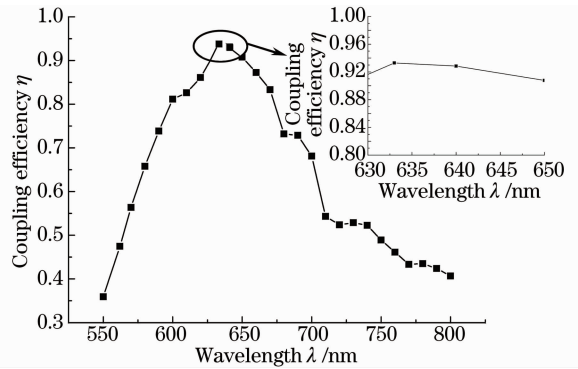


图 7 耦合效率随入射波长变化

Fig. 7 Coupling efficiency variation as the incident wavelength changing

微型化光纤耦合器,这对于研发设计其他微型光纤器件也具有一定的参考意义。

5 结 论

对三根平行微纳光纤进行了详细的数值模拟研究,通过计算,分析了纤芯间距 d 分别为 0.35 、 0.45 、 $0.55 \mu\text{m}$ 时及分别入射 x 偏振和 y 偏振光时三根平行微纳光纤的耦合特性,并由此设计出了一种 3×1 微纳光纤耦合器。所得结果表明,在入射光偏振态和纤芯间距改变时,三根平行微纳光纤随传输距离变化的功率耦合分布的规律是相似的,都呈周期性分布。另外,纤芯间距不同时,耦合周期也发生变化,并且随着纤芯间距的增大,耦合周期也逐渐增大,且入射光偏振态对耦合周期也有轻微的影响。对于此 3×1 微纳光纤耦合器,入射 y 偏振光的耦合效率要高于入射 x 偏振光。当入射 y 偏振光、纤芯间距 $d=0.4 \mu\text{m}$ 和耦合区长度 $L=1.3 \mu\text{m}$ 时,可达到 93.3% 的最佳耦合效率。相比于普通的光纤耦合器,该耦合器尺寸在微纳级,为实现器件的微型化、集成化提供了好的理论基础和技术参考,具有一定的实际应用意义。

参 考 文 献

- 1 Tong L, Sumetsky M. Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Fibers[M]. Zhejiang: Zhejiang University, 2011.
- 2 Hou Jianping, Gai Shuanglong, Ning Tao, et al.. Gas refractive index sensing using subwavelength diameter optical fiber based on intermodal interference[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(8): 1413-1417.
- 3 侯建平, 盖双龙, 宁 韬, 等. 一种基于模间干涉的亚波长直径光纤气体折射率传感[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1413-1417.
- 4 Wu P, Sui C, Ye B. Simulation of single mode nanowires for ambient refractive index sensing[C]. Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2009. 1-3.
- 5 Liu Yinggang, Che Fulong, Jia Zhen'an, et al.. Investigation on the characteristics of micro/nano fiber Bragg grating for refractive

- index sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104218–104218.
- 刘颖刚, 车伏龙, 贾振安, 等. 微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 104218–104218.
- 5 Guo X, Tong L. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. *Opt Express*, 2008, 16(19): 14429–14434.
- 6 Zhang L, Lou J, Tong L. Micro/nanofiber optical sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 31–42.
- 7 Chen G Y, Ding M, Newson T P, *et al.*. A review of microfiber and nanofiber based optical sensors [J]. *The Open Optics Journal*, 2013, 7: 32–57.
- 8 Zhao Zheming, Wu Pinghui, Sui Chenghua. A novel microfiber sensor based on white light interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 2001–2004.
- 赵浙明, 吴平辉, 隋成华. 基于白光干涉的新型微纳光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2001–2004.
- 9 Wang S, Wang J, Li G, *et al.*. Modeling optical microfiber loops for seawater sensing[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(15): 3017–3023.
- 10 Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(4): 043001.
- 11 Hong Z, Li X, Zhou L, *et al.*. Highly-efficient optical power combiners based on evanescently-coupled micro/nano optical fibers[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(17): 3592–3596.
- 12 Hong Z, Zhou L, Li X, *et al.*. Design and analysis of a highly efficient coupler between a micro/nano optical fiber and an SOI waveguide[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(16): 3410–3415.
- 13 Du Yao, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. All micro-fiber polarization filter based on evanescent field coupling[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0610002.
- 杜 垚, 陈 哲, 余健辉, 等. 耦合型微纳光纤偏振滤光器研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0610002.
- 14 Xiao Y, Meng C, Wang P, *et al.*. Single-nanowire single-mode laser[J]. *Nano Lett*, 2011, 11(3): 1122–1126.
- 15 Zhang Y, Lin B, Tjin S C, *et al.*. Refractive index sensing based on higher-order mode reflection of a microfiber Bragg grating[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26345–26350.
- 16 Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, *et al.*. Optical microfiber loop resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(16): 161108.
- 17 Chen Z, Hsiao V K S, Li X, *et al.*. Optically tunable microfiber-knot resonator[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14217–14222.
- 18 Feng Lishuang, Deng Xuewen, Ren Xiaoyuan, *et al.*. Research on hollow core photonic bandgap fiber ring resonator based on micro-optics structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0806002.
- 冯丽爽, 邓学文, 任小元, 等. 基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0806002.
- 19 Guo W, Chen Y, Xu F, *et al.*. Modeling of the influence of coupling in optical microfiber resonators[J]. *Opt Express*, 2012, 20(13): 14392–14399.
- 20 Hong Z, Li X, Zhou L, *et al.*. Coupling characteristics between two conical micro/nano fibers: simulation and experiment[J]. *Opt Express*, 2011, 19(5): 3854–3861.
- 21 Huang K, Yang S, Tong L. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(9): 1429–1434.
- 22 Sumetsky M. How thin can a microfiber be and still guide light? [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(7): 870–872.
- 23 He Fanglong, He Yibin, Lu Xinzhen. *Finite Element Method and Its Application* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 1–5.
- 何放龙, 何益斌, 陆新征. *有限元法及其应用* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 1–5.
- 24 You Yang, Zhao Ming, Yang Zhenyu. Progress of study on waveguide and fiber coupling design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020007.
- 尤 杨, 赵 茗, 杨振宇. 波导与光纤耦合设计研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020007.
- 25 Sun Bing, Chen Mingyang, Qian Chunlin, *et al.*. Design of a broadband directional coupler based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706010.
- 孙 兵, 陈明阳, 钱春霖, 等. 基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706010.

栏目编辑: 王晓瑛