

doi:10.3788/gzxb20144309.0906008

全光纤模式转换器的设计及优化

陆驹¹, 陈明阳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, 南京 211189)

摘 要:提出了一种新型全光纤 LP₀₂ 模宽带模式转换器. 基于模式匹配原理采用双芯光纤设计, 利用 LP₁₁ 模作为中间过渡模式, 实现了宽带模式转换. 运用光束传播法和模式耦合理论分析了光纤参量对有效折射率的影响, 选择合适的光纤参量实现了模式匹配, 分析了纤芯距离等参量对模式转换效率和带宽的影响, 对比相同光纤参量下, 直接和间接模式转换方法, 数值模拟表明, 采用间接法能够有效提高模式转换带宽, 当要求转换效率大于 80% 时, 这种模式转换器带宽能够达到 121 nm.

关键词: 光纤光学; 模式转换器; 带宽; 转换效率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)09-0906008-5

Design and Optimize of All-fiber Mode Converter

LU Ju¹, CHEN Ming-yang¹, ZHANG Yong-kang²

(1 Department of Optical Engineering, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: An all-fiber LP₀₂ broadband mode converter is proposed in this paper. Broadband is achieved when LP₀₁ mode is converted to LP₀₂ mode by using LP₁₁ mode as an intermediate mode based on the mode matching principle and the designed dual-core fiber. The relationship between fiber parameters and the effective index was investigated as well as structure parameters and conversion bandwidth, and the structure is optimized by using the beam propagation method and the mode coupling theory. The bandwidth is compared of the method convert LP₀₁ mode to LP₀₂ mode directly with the method using LP₁₁ mode as an intermediate mode. Simulation results show that the intermediate method can improve the bandwidth and conversion bandwidth can reach 121nm with a conversion efficiency over 80%.

Key words: Fiber optics; Mode converter; Bandwidth; Conversion efficiency

OCIS Codes: 060.2310; 230.1150; 060.4510; 060.1810

0 引言

单模光纤广泛应用在通信、传感等领域,但是由于其传输能力已达到极限^[1]. 人们开始探索提高光纤传输容量的新技术. 空分复用被认为是进一步提高光纤通信容量的方法. 在空分复用系统中,最典型的方法是在多芯光纤^[2]或者多模光纤^[3-4]上实现空分复用,即以同一根光纤的不同纤芯或者不同模式传输不同信号. 其中后者也称为模分复用,即除了光纤基模外,还采用

高阶模传输不同的信号. 高阶模传输技术也可用于色散补偿,例如 Choi S 等提出了采用高阶模传输进行色散补偿^[5],从而实现大模场、低损耗的光传输^[6].

当使用高阶模在光纤中传输时,需要借助模式转换器来实现 LP₀₁ 模与其他模式之间的转换. 为减少模式间的串扰^[7],要求转换后模式纯度高. 光纤模式转换器是一种实现光纤中不同模式场之间转换的器件,其中最常见的是基于光纤光栅^[8]的模式转换器,这种方法的缺点是转换后高阶模与基模在同一根光纤中传

基金项目:江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助

第一作者:陆驹(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤技术等. Email: ujsluju@163.com

导师:张永康(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为激光加工技术等. Email: zyksu@163.com

通讯作者:陈明阳(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为微结构光纤及其应用等. Email: miniyong@163.com

收稿日期:2013-12-20;录用日期:2014-03-17

<http://www.photon.ac.cn>

输,导致模式串扰. K. Lai 等^[9-10]提出了基于光子晶体光纤熔锥技术的全光纤模式转换器,这种器件能在很宽的带宽内实现高消光比的模式转换,但这种器件制作工艺要求高. 此外采用单模-多模-少模光纤组合而成的多模干涉耦合器^[11]和非对称双芯光子晶体光纤^[12]也可以实现模式转换. 非对称双芯光子晶体光纤中,调整纤芯和空气孔的参量,有效折射率能够在较宽波长范围内相位匹配,可以实现宽带、低损耗模式之间的相互转换,但是结构较为复杂. Ganbin Lin 等^[13]提出了一种基于双芯光纤的模式转换器,利用不同纤芯之间的模式耦合实现 LP_{01} 模和 LP_{02} 模的转换,并通过拉锥提高其转换效率,这种结构可用于高阶模色散补偿中的模式转换,其转换效率大于 80% 的带宽为 31 nm.

本文提出了一种新型全光纤模式转换器,利用 LP_{11} 模作为中间过渡转换模式,实现宽带的 LP_{02} 模模式转换.

1 模式转换器结构与参量设计

1.1 模式转换器结构

根据耦合理论,对于距离较近的两个纤芯,若其中一个纤芯中的一个模式与另一个纤芯中另一个模式的有效折射率在某波长相等,则这两个模式相位匹配,两个模式可以在两纤芯之间相互转换. 因此,只需设计两个纤芯使其中一个纤芯的基模与另一个纤芯的 LP_{02} 模的有效折射率在某波长相等,则其即可实现模式转换. 在有效折射率不相等的其它波长,其模式转换效率就会下降. 由于这种方法得到的模式转换器带宽一般较窄. 本文提出一种先将光纤基模转换为 LP_{11} 模,再将 LP_{11} 模转换为 LP_{02} 模的方法,即采用两个光纤耦合器,实现宽带模式转换. 采用的光纤耦合器均通过光纤侧面研磨组成,即将两个不同纤芯的光纤分别磨去部分包层,并将两者贴合在一起,从而实现两纤芯中模式的耦合. 两种光纤耦合器耦合区的横截面示意图如图 1

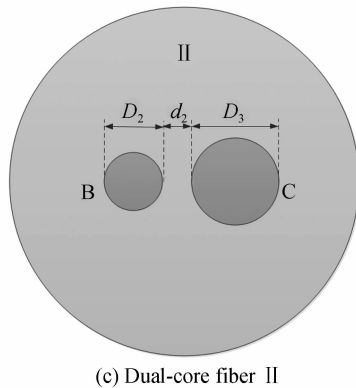
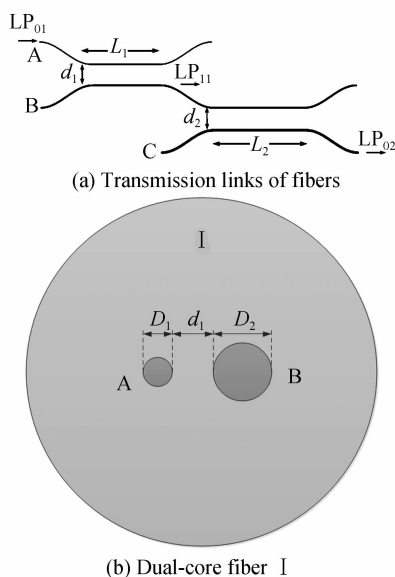


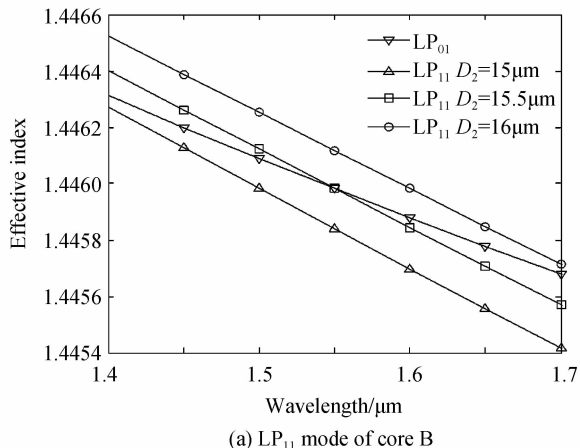
图 1 模式转换器结构
Fig. 1 The schematic of mode converter

(a). 其中纤芯 A 为单模传输,光从纤芯 A 输入,纤芯 A 的基模和纤芯 B 的 LP_{11} 模在耦合区发生耦合,使光从纤芯 B 输出. 从纤芯 B 输出的 LP_{11} 模再与纤芯 C 的 LP_{02} 模发生耦合,将光转换为 LP_{02} 模,从纤芯 C 输出. 这种结构同样也可实现反向转换,即 LP_{02} 模从纤芯 C 输入,经纤芯 B 转换为 LP_{11} 模,再与纤芯 A 耦合,转换为 LP_{01} 模.

1.2 模式转换器参量设计

假设纤芯 A、B、C 的直径分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 ,包层均为纯石英,纤芯包层折射率差均为 Δn ,纤芯 A 和纤芯 B 之间距离为 d_1 ,纤芯 B 和纤芯 C 之间距离为 d_2 .

首先固定纤芯 A 的直径,取 $D_1 = 7.9 \mu\text{m}$,纤芯与包层折射率差为 0.005,从而保证纤芯 A 在 $1.55 \mu\text{m}$ 处保持单模传输. 分别调节纤芯 B、C 的直径,使纤芯 A 的 LP_{01} 模、纤芯 B 的 LP_{11} 模和纤芯 C 的 LP_{02} 模的有效折射率在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处相等. 不同纤芯直径下纤芯 B 的 LP_{11} 模和纤芯 C 的 LP_{02} 模的有效折射率随波长的关系如图 2. 由图可知,应取 $D_2 = 15.5 \mu\text{m}$, $D_3 = 24.3 \mu\text{m}$. 此时,纤芯 A 的 LP_{01} 模,纤芯 B 的 LP_{11} 模和纤芯 C 的 LP_{02} 模的有效折射率随波长变化关系如图 3. 从图中可以看出除匹配点外,纤芯 C 与纤芯 A 的差别最大,而纤芯 B 的 LP_{11} 模的有效折射率介于纤芯 A 的 LP_{01} 模和纤芯 C 的 LP_{02} 模有效折射率之间. 因此,



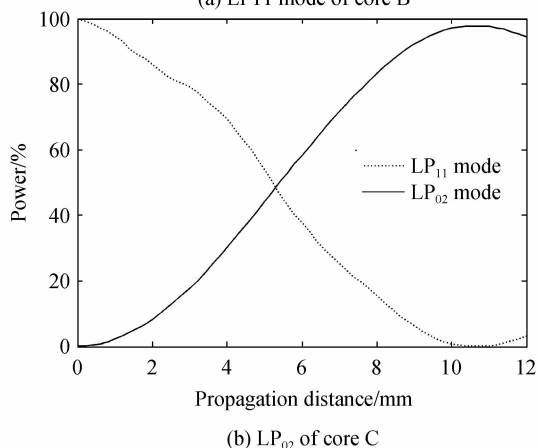
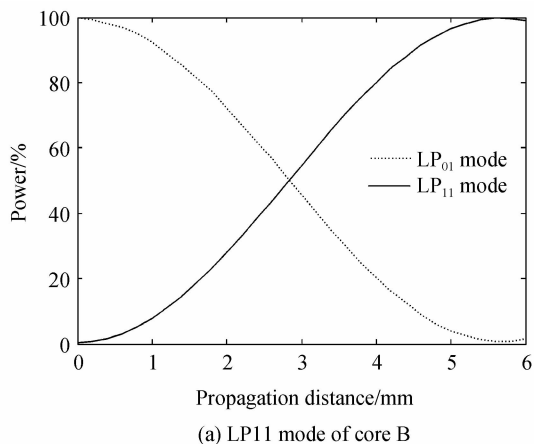
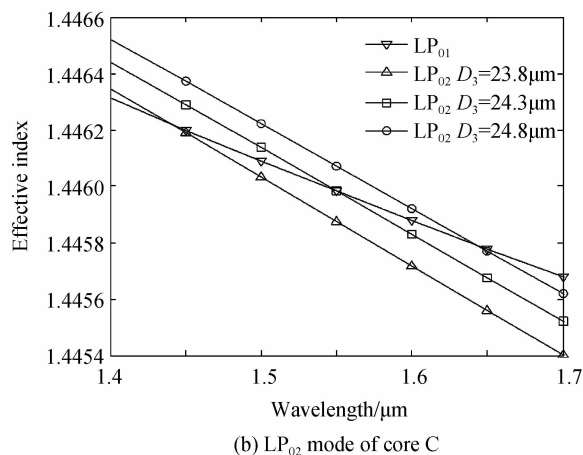


图2 不同纤芯直径下,有效折射率随波长的关系
Fig. 2 Effective index with different diameters of the core
若模式转换器由 LP_{01} 模直接转换为 LP_{02} 模,则由于两个模式的有效折射率差别较大,其耦合带宽较窄.若将 LP_{01} 模先转换为 LP_{11} 模,由于两模式的有效折射率差别小,其转换带宽更宽.同样,将 LP_{11} 模再转换为 LP_{02} 模时,其带宽也同样会增宽.这样,综合起来,就可能使 LP_{01} 模转换为 LP_{02} 模的带宽增宽.

图4 纤芯中能量随传输距离的关系

Fig. 4 Core power with propagation distance

当 $d_1 = d_2 = 6 \mu\text{m}$ 时,纤芯中模场的变化如图5.从图中可以看出光纤 I 中,传输长度从 0 到耦合长度 L_1 变化的过程中, LP_{01} 模逐渐转换到 LP_{11} 模;同样,光纤

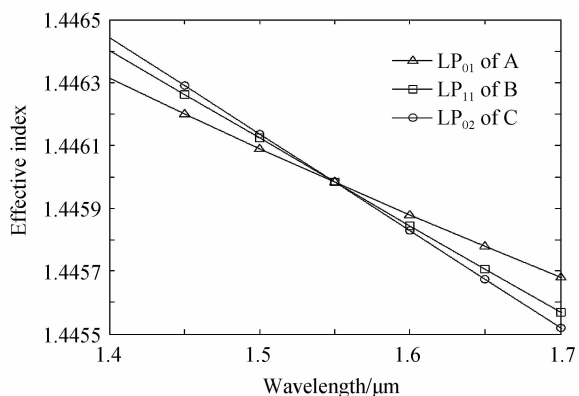


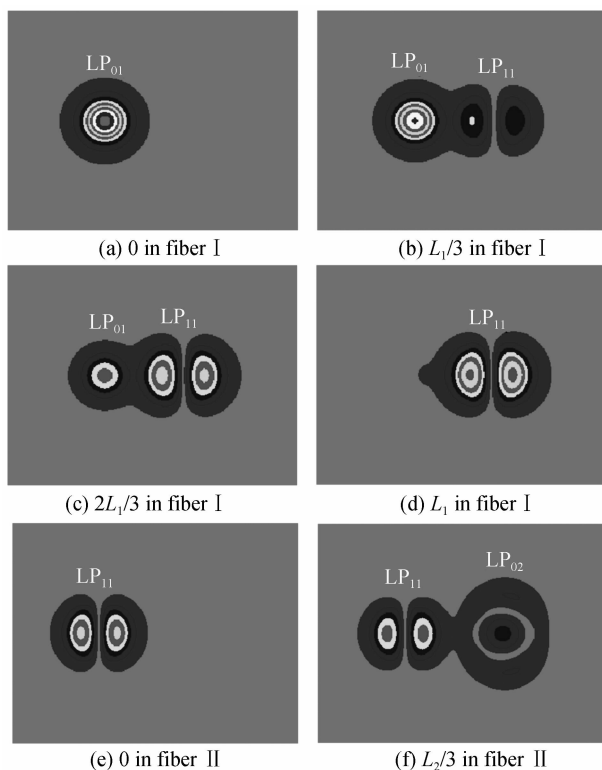
图3 纤芯 A 的 LP_{01} 模、纤芯 B 的 LP_{11} 模和纤芯 C 的 LP_{02} 模有效折射率与波长的关系

Fig. 3 Effective index of LP_{01} mode in core A, LP_{11} mode in core B, LP_{02} mode in core C

2 模式转换器带宽分析及优化

2.1 纤芯能量随传输距离的关系

采用光束传播法研究模式转换器的传输特性.取 $d_1 = d_2 = 6 \mu\text{m}$,计算光波长 $1.55 \mu\text{m}$ 时的能量传输曲线.其中,对于双芯光纤 I, LP_{01} 模从左侧纤芯输入,其能量曲线如图4.由图可见,这种结构可以将 LP_{01} 模转换为 LP_{11} 模.相似的,双芯光纤 II 可将从左侧纤芯输入的 LP_{11} 模转换为右侧纤芯的 LP_{02} 模.光纤 I、II 的耦合长度分别为 5.66 mm 、 10.63 mm .因此,将上述两光纤串联,即可实现将 LP_{01} 模转换为 LP_{02} 模.由于模式从不同输出端输出,因此,可以保证最后输出的 LP_{02} 模不包含其它模式成份,从而实现低串扰的模式转换.



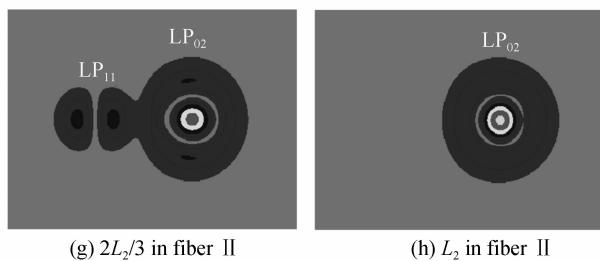


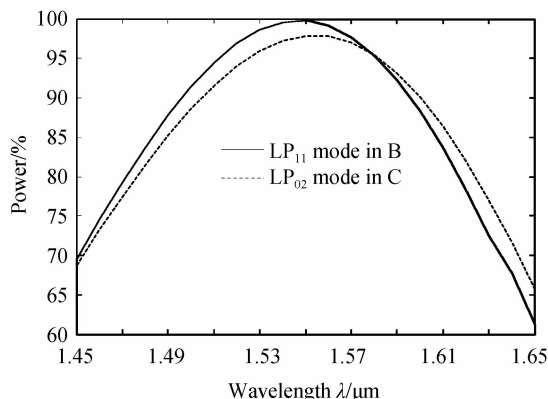
图5 不同传输长度处,纤芯中的模场分布

Fig. 5 Field profiles of different fiber for propagation distance

II中,传输长度从0到耦合长度 L_2 变化的过程中, LP_{11} 模逐渐转换到 LP_{02} 模,并且转换效率都很高。

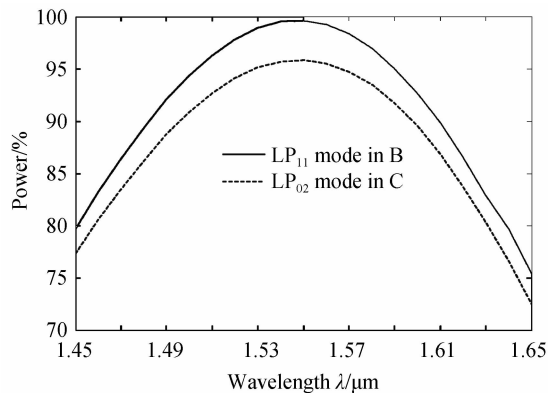
2.2 模式转换器带宽分析

在非折射率匹配点,本文光纤结构仍可实现较高效率的模式转换。 LP_{01} 模转换到 LP_{11} 模、 LP_{11} 模转换到 LP_{02} 模转换效率随波长的关系如图6。与文献[12]相同,本文定义转换效率大于80%的波长范围为工作波长,则 LP_{01} 模到 LP_{02} 模的总的工作波长范围为1498~1600 nm,工作带宽达到102 nm。

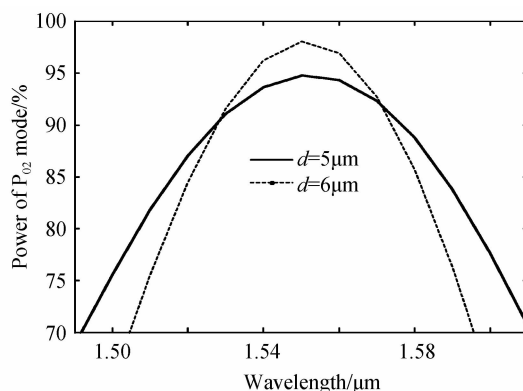
图6 $d_1=d_2=6\ \mu\text{m}$,转换效率随波长的关系Fig. 6 Conversion efficiency for the couplers with $d_1=d_2=6\ \mu\text{m}$

由模式耦合理论^[14],纤芯距离 d_1 、 d_2 减小会导致耦合效率增加,但是也会导致制作难度增加,综合考虑,适当的减小纤芯距离 d_1 、 d_2 能够获得较理想的带宽。例如,当 $d_1=d_2=5\ \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模转换到 LP_{11} 模、 LP_{11} 模转换到 LP_{02} 模转换效率随波长的关系如图7。 LP_{01} 模到 LP_{02} 模的总工作波长范围为1486~1607 nm,带宽为121 nm,此时的工作带宽要大于 $d_1=d_2=6\ \mu\text{m}$ 时的工作带宽。

作为对比,分析由纤芯A和纤芯C组成的双芯光纤的模式转换性能。纤芯A、C采用和上文同样的参量,即 $D_1=7.9\ \mu\text{m}$ 、 $D_3=24.3\ \mu\text{m}$,纤芯A、C的长度为 L ,纤芯A、C之间距离为 d 。分别取 $d=5$ 和 $6\ \mu\text{m}$,纤芯A、C的长度 L 为纤芯A、C的耦合长度,即分别为7.18 mm、9.82 mm。 LP_{02} 模的转换效率随波长的关系如图8,从图中可以看出 $d=6\ \mu\text{m}$ 时,工作波长范围为

图7 $d_1=d_2=5\ \mu\text{m}$,转换效率随波长的关系Fig. 7 Conversion efficiency of LP_{11} mode and LP_{02} mode when $d_1=d_2=5\ \mu\text{m}$

1514~1587 nm,带宽为73 nm; $d=5\ \mu\text{m}$,工作波长范围为1507~1596 nm,带宽为89 nm。相比利用 LP_{11} 模作为过渡模式进行模式转换时,带宽分别减小了29和32 nm。

图8 $d=5$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 时, LP_{01} 模直接转换到 LP_{02} 模转换效率随波长的关系Fig. 8 Conversion efficiency of LP_{02} mode converted from LP_{01} mode when the distance $d=5$ and $6\ \mu\text{m}$

3 结论

本文提出了一种新型全光纤宽带模式转换器,采用两步模式转换的方法,实现了 LP_{01} 模到 LP_{02} 模的模式转换,并分析了结构参量对模式转换器带宽的影响。适当减小纤芯距离有助于提高模式转换器的带宽,且原始模式不会对转换模式产生串扰,其工作带宽仅受限于模式的转换效率。本方法也能够被推广应用到 LP_{01} 模和其它高阶模之间的转换。

参考文献

- [1] ESSIAMBRE R, KRAMER G, WINZER P, *et al.* Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(4): 662-701.
- [2] SAKAGUCHI J, AWAJI Y, WADA N, *et al.* Space division multiplexed transmission of 109-Tb/s data signals using homogeneous seven-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 658-665.
- [3] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A, *et al.* Mode-division

- multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6x6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 521-531.
- [4] LI A, CHEN X, AL A A, *et al.* Space-division multiplexed high-speed superchannel transmission over few-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(24): 3953-3964.
- [5] CHOI S, OH K. A new LP₀₂ mode dispersion compensation scheme based on mode converter using hollow optical fiber[J]. *Optics Communications*, 2003, **222**(1): 213-219.
- [6] RAMACHANDRAN S, NICHOLSON J, GHALMI S, *et al.* Light propagation with ultralarge modal areas in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(12): 1797-1799.
- [7] ZHANG Lei-lei, FU Ming-lei, LE Zi-chun. Crosstalk analysis and simulation of the DWDM based light-trail networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 271-276.
张蕾蕾, 付明磊, 乐孜纯. 密集波分复用条件下的光轨网络串扰分析与仿真[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 271-276.
- [8] RAMACHANDRAN S. Dispersion-tailored few-mode fibers: a versatile platform for in-fiber photonic devices[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(11): 3426-3443.
- [9] LAI K, LEON-SAVAL S G, WITKOWSKA A, *et al.* Wavelength-independent all-fiber mode converters[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(4): 328-330.
- [10] WITKOWSKA A, LEON-SAVAL SG, PHAM A, *et al.* All-fiber LP₁₁ mode converters[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(4): 306-308.
- [11] TSEKREKOS C, SYVRIDIS D. All-fiber broadband LP₀₂ mode converter for future wavelength and mode division multiplexing systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(18): 1638-1641.
- [12] SUN Bing, CHEN Ming-yang, ZHOU Jun, *et al.* Design of a broadband mode converter based on an asymmetric dual-core photonic fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1581-1585.
孙兵, 陈明阳, 周骏, 等. 非对称双芯光子晶体光纤宽带模式转换器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1581-1585.
- [13] LIN Gan-bin, DONG Xiao-peng. Design of broadband LP₀₁↔LP₀₂ mode converter based on special dual-core fiber for dispersion compensation[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(19): 4388-4393.
- [14] HUANG Wei-ping. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics*, 1994, **11**(3): 963-983.