

文章编号: 0253-2239(2010)s100303

# 双折射多孔光纤超宽带稳定拍长的优化设计

石志东<sup>1</sup> 林建强<sup>1,2</sup> 李铭佳<sup>1</sup> 季敏宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)  
<sup>2</sup> 广西工学院信息与计算科学系, 广西 柳州 545006)

**摘要** 在保持正六角晶格不变的条件下,通过改变纤芯附近多个圆形微孔的直径大小,在多孔光纤截面中引入三种非对称结构,利用正负双折射相互补偿来调控并扩大双折射率随波长变化的线性区间。采用全矢量波束传播法并考虑熔融石英的材料色散,计算分析了不同结构参数对偏振拍长色散曲线的影响。考虑到工艺制作的可行性,通过优化结构参数,在同时覆盖 1310 nm 和 1550 nm 波长窗口的超宽带范围内获得了偏振拍长约为 9 cm 的平坦色散曲线,在 1250~1650 nm 波长范围内,拍长相对变化率小于 0.15%;在 1000~1900 nm 波长范围内,相对变化率小于 0.85%。这种光纤适合制作宽带光纤波片,用于光纤传感器中提高系统的稳定性和可靠性。

**关键词** 光纤光学;多孔光纤;模式双折射;偏振拍长;波长敏感性

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100303

## Optimal Design for Holey Birefringence Fiber with Stable Polarization Beat-Length in Super-Wide Band

Shi Zhidong<sup>1</sup> Lin Jianqiang<sup>1,2</sup> Li Mingjia<sup>1</sup> Ji Minning<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China  
<sup>2</sup>Department of Information and Computation of Science, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China

**Abstract** Three asymmetric structures are introduced into cross-section of holey fiber by changing the size of diameters of micro holes near the fiber core while maintaining the hexagonal lattice. The linear variation of birefringence over wavelength is controlled and expanded by the compensation between the positive and negative ones. Full-wave beam-propagation-method is used to calculate influence of different structural parameters on the beat-length dispersion, including the material dispersion of fused silica. Considering the permission of fabrication art, flat dispersion curve of beat-length about 9 cm is obtained by parameters' optimization in super-wide band covering both 1310 nm and 1550 nm wavelength windows commonly used in the optical telecommunications. The relative change of beat-length is less than 0.15% in 1250~1650 nm band, and 0.85% in 1000~1900 nm. This optimal fiber is suitable for making wideband fiber-optic wave-plate used in fiber sensors to promote the systematic stability and liability.

**Key words** fiber optics; holey fiber; modal birefringence; polarization beat length; wavelength sensitivity

**OCIS codes** 060.2280; 060.2310; 260.1440

### 1 引 言

多孔光纤(HF)的包层中含有二维周期性排列的微小气孔(微量量级),而纤芯是纯石英材料或空芯结构<sup>[1,2]</sup>。HF截面结构参数的可变范围很大,通过合理的设计和配置,可以对光纤的各种传输特性

进行调控<sup>[3,4]</sup>。特别是 HF 包层中微孔大小和分布偏离对称性结构时,就会产生模式双折射,通过合理设计 HF 多孔包层中的非对称性结构,可以将其双折射值提高到接近甚至优于常规应力型双折射光纤(如“熊猫”保偏光纤或“领结”保偏光纤)的数

收稿日期: 2010-06-06; 收到修改稿日期: 2010-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(60777031)和上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108,08DZ2231100)资助课题。

作者简介: 石志东(1964—),男,博士,研究员,主要从事特种光纤偏振特性方面的研究。E-mail: zdshi@shu.edu.cn

值<sup>[5,6]</sup>。双折射光纤的偏振拍长为光源波长与模式双折射之比,是决定其偏振态保持能力及其相关的光纤器件与传感器品质的重要参数。经过一个偏振拍长的光纤长度后,两个正交线偏振分量恰好产生 $2\pi$ 的相位差。一般情况下,双折射光纤的模式双折射及其偏振拍长都随工作波长和环境温度的不同而有所变化。由于双折射多孔光纤(BHF)主要是由非对称结构的微气孔和纯石英材料组成,缓冲了外部应力对纤芯的作用强度,也减缓了环境温度的变化对其性能的影响,它比传统的应力型双折射光纤,具有更好的温度稳定性和偏振态保持能力<sup>[7~9]</sup>。

双折射光纤的一个最直接的应用就是制作光纤波片,将其长度切割为拍长的 $(m \pm 0.25)$ 倍( $m$ 为整数),则该段光纤就能产生 $\pm \pi/2$ 的偏振相位差,其作用等同于 $\lambda/4$ 波片。由于过去制作光纤波片所采用的原型光纤大多为“熊猫”或“领结”等应力型双折射光纤,受其结构中掺杂成分引入的残余热应力、偏振模色散等因素的影响,这些光纤波片普遍存在温度稳定性差、波长带宽小等缺点<sup>[10~12]</sup>。利用BHF光纤制作光纤波片可以大大改善光纤波片的温度稳定性,但是,如果BHF光纤的包层横截面中仅有一种非对称结构,其模式双折射一般随波长非线性变化,因此其偏振拍长的波长敏感性也较大,所制作的光纤波片的工作带宽改善并不明显<sup>[13]</sup>。

为了扩大模式双折射随波长线性变化的波长区间,本课题组曾在多孔光纤截面中引入两种非对称结构进行平衡调节<sup>[14~16]</sup>,优化设计了两种光纤结构参数,分别在1310 nm和1550 nm两个波长窗口得到了偏振拍长的平坦色散曲线,相对带宽达12%。为了能同时覆盖1310 nm和1550 nm这两个光纤通信波长窗口,在两种非对称结构的基础上,考虑到光纤工艺的可行性,本文选择引入第三种非对称结构进行平衡微调,使其偏振拍长在1250~1650 nm的波长范围内基本保持平稳不变。基于这类多孔双折射光纤,可以制作出具有良好的温度和波长稳定性的光纤器件(如宽带光纤波片),应用于光纤陀螺等偏振干涉型的光纤传感器中,能够提高系统的稳定性和可靠性。

## 2 基本原理与设计思路

光纤的模式双折射 $B$ 和偏振拍长 $L_B$ 定义为 $B = n_y - n_x = \frac{\beta_y - \beta_x}{2\pi/\lambda}$ ,  $L_B = \frac{\lambda}{|B|} = \frac{2\pi}{|\beta_y - \beta_x|}$ ,其中 $n_x, n_y$ 和 $\beta_x, \beta_y$ 分别为两个正交偏振模的有效折射率和传播常数, $\lambda$ 为自由空间光波长。可以看

出,偏振拍长是关于波长及双折射的函数,若要其在一定波长范围内基本不随波长变化,则必须模式双折射 $B$ 在此波长范围内与波长同步线性变化。当多孔光纤的双折射仅由截面中的一种非对称结构产生时,双折射率一般随波长呈现非线性的指数变化,远远高于波长本身的增长斜率,与波长同步线性变化的区间非常短。为了降低偏振拍长的波长敏感性,必须抑制双折射随波长的增长速率。

常规单模阶跃光纤的包层折射率与波长几乎无关,而多孔光纤的包层有效折射率则与波长密切相关。根据等效折射率模型进行的理论分析表明,当波长减小时,多孔光纤包层有效折射率增大,当波长增大时,多孔光纤包层有效折射率减小。与此对应,长波长光波的模场更多地扩展到包层,外层的非对称结构对其偏振拍长起较多的主导作用;短波长光波的模场更多地集中在纤芯,内层的非对称结构对其偏振拍长起较大的支配作用。为了扩大模式双折射随波长线性变化的波长区间,考虑同时在多孔光纤截面中引入多种非对称结构进行平衡调节,根据不同波长偏振模场的空间分布优化其结构参数,利用正负双折射的相互补偿作用来抑制双折射随波长的非线性变化。

多孔光纤设计方案如图1所示,其包层具有正六边形均匀分布的圆孔(本底微孔)晶格阵列,纤芯由单点缺陷形成。孔心间距为 $\Lambda_0$ ,本底微孔直径为 $d_1 = \rho \Lambda_0$ , $\rho < 1.0$ ,为包层的空气填充比率。图1(b)所示是纤芯附近二圈的微孔分布及尺寸,第一种非对称结构是将 $X$ 方向上靠近纤芯两侧的两个微孔的直径缩小为 $d_3$ ,( $d_3 < d_1$ ),这会引入负值双折射 $[B(\lambda) < 0]$ ,第二种非对称结构是将 $Y$ 方向上靠近纤芯两侧的两个微孔的直径缩小为 $d_2$ ,( $d_2 < d_1$ ),这将会引入正值双折射 $[B(\lambda) > 0]$ ,第三种非对称结构是将 $X$ 方向上第二圈两个微孔的直径放大或缩小为 $d_4$ ,当 $d_4 < d_1$ 时,将会在长波段引入负值双折射 $[B(\lambda) < 0]$ ,当 $d_4 > d_1$ 时,将会在长波段引入正值双折射 $[B(\lambda) > 0]$ 。根据前两种非对称结构对偏振拍长波谱曲线的补偿效果,再决定 $d_4$ 是放大或是缩小以及放大或缩小的程度。由于采用了对称的正六边形晶格分布,都是圆形微孔,单一材料无掺杂,其预制棒的制作方法均与均匀微孔光纤基本一样(所有石英毛细管的外径相同,只需将8个石英管的内径进行变化即可),未增加工艺制作的难度。根据目前比较成熟的多孔光纤工艺制作水平,取 $\Lambda_0 = 4.40 \mu\text{m}$ , $\rho = 0.5$ ,即 $d_1 = 2.20 \mu\text{m}$ 。

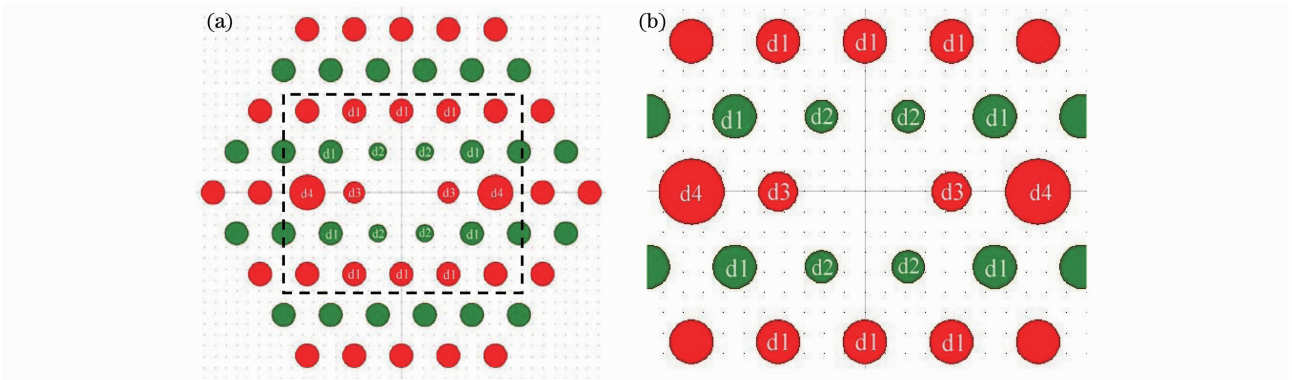


图1 (a)双折射多孔光纤截面结构和(b)纤芯局部放大图

Fig.1 (a) Cross-section of holey birefringence fiber and (b) the expanded cores area

### 3 计算结果与优化设计

采用有限差分波束传播法(FD-BPM)<sup>[17]</sup>,对图1所示多孔光纤的双折射 $B$ 在1000~2000 nm波长范围内的变化情况进行了数值模拟,计算过程中,气孔的折射率设定为1.00,石英材料的折射率由Sellmeier方程给出<sup>[18]</sup>。

首先考察 $d_2, d_3$ 分别减小以及同时减小时双折射随波长的变化规律,分别计算了 $d_2=2.20 \mu\text{m}$ (不变), $d_3=2.00 \mu\text{m}$ (缩小), $d_4=2.20 \mu\text{m}$ (不变); $d_2=2.00 \mu\text{m}$ (缩小), $d_3=2.20 \mu\text{m}$ (不变), $d_4=2.20 \mu\text{m}$ (不变)和 $d_2=2.00 \mu\text{m}$ (缩小), $d_3=2.00 \mu\text{m}$ (缩小), $d_4=2.20 \mu\text{m}$ (不变)时多孔光纤的模式双折射及偏振拍长的变化情况,如图2和图3所示。

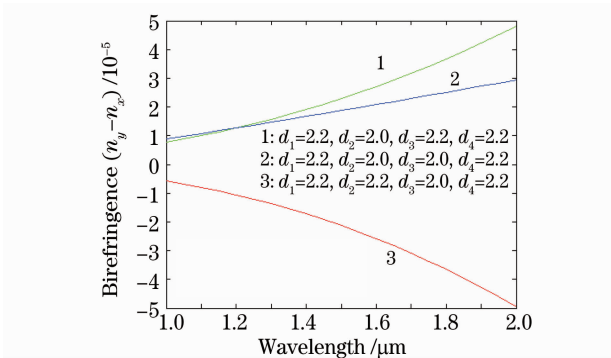


图2  $d_2, d_3$ 分别缩小(3,1)及同时缩小(2)时模式双折射的色散曲线

Fig.2 Dispersion of modal birefringence when  $d_2$  and  $d_3$  decrease respectively (lines 1 and 3) or simultaneously (line 2)

由图2可知,分别减小 $d_2$ 和 $d_3$ 的值所产生的非对称性能使多孔光纤呈现符号相反的模式双折射,对应的拍长曲线随波长增大单调减小。同时减

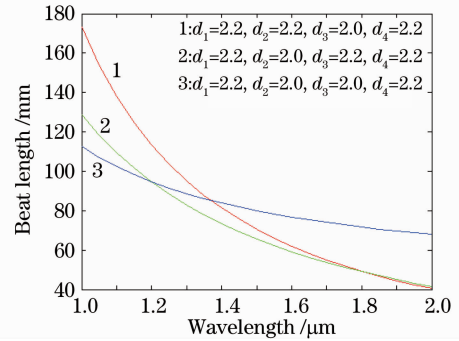


图3  $d_2, d_3$ 分别缩小(1,2)及同时缩小(3)时偏振拍长的色散曲线

Fig.3 Dispersion of polarization beat-length when  $d_2$  and  $d_3$  decrease respectively (lines 1 and 2) or simultaneously (line 3)

小 $d_2$ 和 $d_3$ 后,模式双折射仍然为正,但斜率明显减小,拍长变化也趋于平缓。

经过初步优化,确定 $d_2=1.80 \mu\text{m}, d_3=1.91 \mu\text{m}$ ,在此组参数下,多孔光纤拍长具有较好的平坦度。考虑到多孔光纤制作难度大,若继续针对 $d_2$ 及 $d_3$ 进行优化,拉制工艺将很难满足要求,于是引入 $d_4$ 作为微调变量。为了分析 $d_4$ 对双折射的影响,分别计算了 $d_4=2.20, 2.50, 3.00$ 和 $3.50 \mu\text{m}$ 时多孔光纤的拍长随波长变化曲线,如图4所示。

从图4可以看出,在同一波长处, $d_4$ 值越大拍长值越小。同时,随着 $d_4$ 值增大,在长波长区域,拍长曲线的变化逐渐呈现减小趋势。这表明增大 $d_4$ 的值能产生正值双折射作用,随着波长增大,模场更多地扩散到包层中,增大 $d_4$ 产生的正值双折射作用逐渐明显,拍长值在长波长区域逐渐减小。经过优化,获得了两组设计参数:

1)  $d_1=2.20 \mu\text{m}, d_2=1.80 \mu\text{m}, d_3=1.91 \mu\text{m}, d_4=3.00 \mu\text{m}$ ,这组设计方案在较宽的波长范围内拍

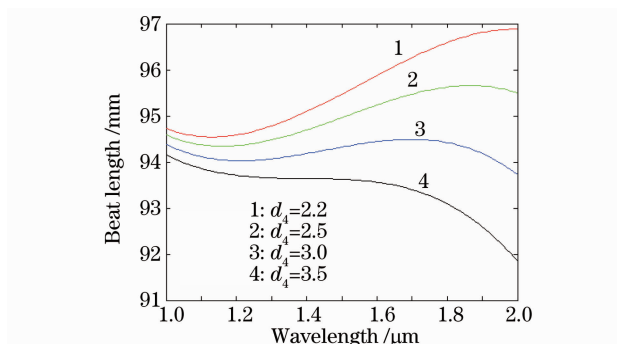


图 4 不同  $d_4$  情况下多孔光纤偏振拍长的色散曲线  
Fig. 4 Dispersion of polarization beat-length of holey fiber with different  $d_4$

长变化曲线较为平坦,在 1250~1650 nm 波长范围内,拍长相对变化率小于 0.53%;在 1000~1900 nm 波长范围内,相对变化率小于 0.85%。

2)  $d_1=2.20 \mu\text{m}$ ,  $d_2=1.80 \mu\text{m}$ ,  $d_3=1.91 \mu\text{m}$ ,  $d_4=3.50 \mu\text{m}$ , 这组设计方案在 1.2~1.7  $\mu\text{m}$  波长范围内拍长几乎不变,在 1250~1650 nm 波长范围内,拍长相对变化率小于 0.15%;1310 nm 处与 1550 nm 处拍长的相对差值小于 0.10%。

## 4 讨 论

为了分析多孔光纤拉制过程中可能引入的结构误差对偏振拍长色散曲线的影响,针对第一组设计参数,分别计算了  $d_2$ ,  $d_3$  及  $d_4$  存在  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$  误差时的归一化拍长色散曲线,如图 5~7 所示。

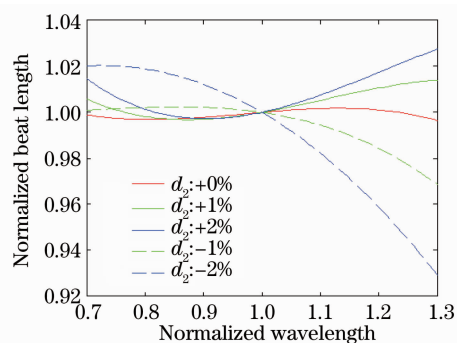


图 5  $d_2$  存在不同误差时的归一化拍长色散曲线  
Fig. 5 Normalized dispersion of polarization beat-length for different errors of  $d_2$

比较 3 个参数的误差对拍长曲线的影响可以发现,  $d_3$  的误差对拍长稳定性的影响较大,  $\pm 1\%$  的误差将会使工作带宽减小 60% 以上。相比而言,微调变量  $d_4$  的误差对拍长曲线的平坦度的影响最小,而  $d_2$  的误差造成的影响也很小。因此,在制作多孔光纤时应严格控制  $d_3$  的尺寸,并将  $d_2$  的误差控制在 2% 以下,  $d_4$  的误差容限可达 10%。

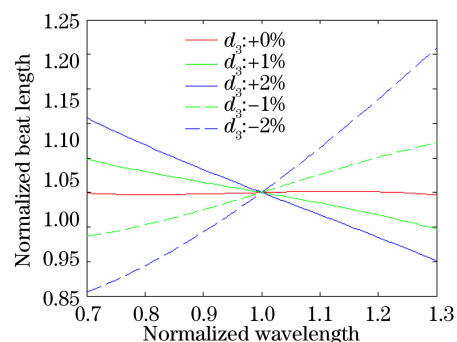


图 6  $d_3$  存在不同误差时的归一化拍长色散曲线  
Fig. 6 Normalized dispersion of polarization beat-length for different errors of  $d_3$

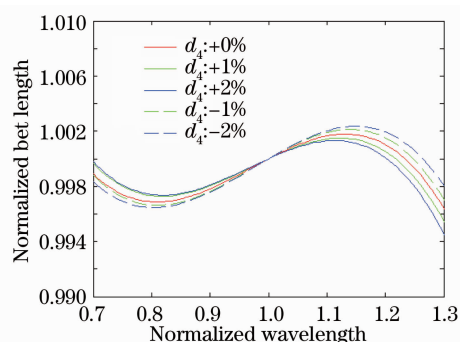


图 7  $d_4$  存在不同误差时的归一化拍长色散曲线  
Fig. 7 Normalized dispersion of polarization beat-length for different errors of  $d_4$

## 5 结 论

本文所设计的多孔光纤具有正六边形均匀分布的圆孔晶格阵列,纤芯由单点缺陷形成。在靠近纤芯两圈内,改变 8 个微孔的内径,形成 3 种非对称性,既能有效地调节偏振拍长的色散曲线,又能保证一定的工艺可行性。经过优化设计获得了超宽带稳定的偏振拍长,可以同时覆盖 1310 nm 和 1550 nm 两个波长窗口。此种优化设计的双折射多孔光纤可用于制作超宽带稳定的光纤器件,集成于光纤传感器中,可以提高系统的稳定性和可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 J. C. Knight, P. St. J. Russell. New ways to guide light [J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276~277
- 3 T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 4 J. C. Knight. Large mode area photonic crystal fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1347~1348
- 5 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327

- 6 S. Q. Lou, G. B. Ren, Z. Wang *et al.*. Polarization properties of high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1503~1507  
娄淑琴, 任国斌, 王智等. 高双折射光子晶体光纤的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1503~1507
- 7 A. Michie, J. Canning, K. Lyytikainen *et al.*. Temperature independent highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5160~5165
- 8 T. Martynkien, M. Szpulak, W. Urbanczyk. Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(36): 7780~7788
- 9 Y. Wei, D. Y. Chang, K. Zheng *et al.*. Numerical simulation of temperature properties of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 945~951  
卫延, 常德远, 郑凯等. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 945~951
- 10 H.-C. Huang. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18): 4241~4258
- 11 S. X. Short, A. A. Tselikov. Imperfect quarter-waveplate compensation in sagnac interferometer-type current sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7): 1212~1219
- 12 A. H. Rose, N. Feat, S. M. Etzel. Wavelength and temperature performance of polarization transforming fibers [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34): 6897~6904
- 13 Z. Shi, M. Ji, J. Lin *et al.*. Quarter wave plate made by cutting straight holey birefringent fiber [C]. *SPIE*, 2008, **7134**: 713449
- 14 J. Lin, Z. Shi, M. Li *et al.*. Structural design for birefringent holey fiber with a beat length insensitive to wavelength [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(25): F55~F60
- 15 Z. Shi, M. Li, J. Yin *et al.*. Optimal cladding structure of holey fiber designed for broadband fiber-optic wave plate[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750371
- 16 Li Mingjia, Shi Zhidong, Yin Jun *et al.*. Design for holey fiber with birefringent beat length independent of wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 665~670  
李铭佳, 石志东, 殷俊等. 双折射拍长对波长不敏感的多孔光纤结构设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 665~670
- 17 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
- 18 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. (3<sup>rd</sup> ed.) Academic. 2001