

文章编号: 0253-2239(2005)03-297-5

高数值孔径双芯光纤的双折射研究*

傅永军 简伟 郑凯 任国斌 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 100044 北京)

摘要: 具体分析了具有高数值孔径的双芯光纤的双折射特性。首先利用超格子正交函数法和耦合模理论分析了双芯光纤的几何双折射,并将两种方法计算的几何双折射进行了比较分析。数值计算结果表明双芯光纤在两纤芯非常接近的情况下,几何双折射仍较小,只能到 10^{-5} 量级。利用超格子正交函数法计算了双椭圆芯光纤的双折射,改变结构参量可使几何双折射达到 10^{-4} 量级。高的数值孔径需要高的掺锗量,理论上分析了高数值孔径时双芯光纤功率集中区域的应力双折射,应力双折射接近 10^{-4} 量级。设计制作出了具有良好保偏性能的双芯掺铒光纤,测试、分析了它的几何参量和折射率分布;双芯光纤双折射系数达到了 8.4×10^{-5} 。双芯掺铒光纤可以作为保偏掺铒光纤,应用到制作具有稳定的单一偏振态输出的光纤激光器。

关键词: 光通信; 双芯光纤双折射; 超格子正交函数法

中图分类号: TN25 文献标识码: A

The Birefringence Characteristics of High Numerical Aperture Twin-Core Fiber

Fu Yongjun Jian Wei Zheng Kai Ren Guobin Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: We explore the birefringence characterization of twin-core fiber (TCF) with high numerical apertures. Firstly the super cell lattice orthogonal function method and mode couple theory are used to analyze the geometrical birefringence of the TCF, then we make comparison of the results that calculated from the two different methods. The results show that the geometrical birefringence of TCF is not enough high even when the cores are touching; the maximum geometrical birefringence is only at 10^{-5} . The maximum geometrical birefringence of twin elliptical core fiber can reach 10^{-4} , which is calculated from super cell lattice orthogonal function method. High concentration of germanium is needed to keep high NA. We calculate the stress birefringence of the TCF with high NA in the area of assembling of light power, which approximates to 10^{-4} . The twin-core erbium doped fiber (TCEDF) with well polarization maintaining performance is designed and fabricated, the geometrical parameters and refractive index distribution of the twin-core fiber are measured and analyzed, and the birefringence coefficient of twin-core fiber reaches 8.4×10^{-5} . TCEDF with high NA can be used as polarization maintaining EDF that is a key component in optical fiber lasers with single polarization output.

Key words: optical communication; birefringence of twin-core fiber; super cell lattice orthogonal function method

1 引 言

双芯光纤在近年来得到了广泛的关注。目前最主要的应用就是实现掺铒光纤放大器多信道放大时的增益均衡^[1~3],另外,利用双芯光纤还可以制作方向耦合器^[4]、波分复用器^[5]、用于光纤激光器稳定的

窄带滤波器^[6]、可变衰减器^[7]和利用耦合器非线性效应的全光开关^[8]。但有关利用双芯掺铒光纤作为保偏光纤的报道尚不多见。掺铒光纤激光器也是当前研究的一个热点^[9],而目前大部分光纤激光器不能保证输出偏振态的稳定,在光纤通信系统中的应

* 国家 863 计划(2001AA312230)资助课题。

作者简介: 傅永军(1977~),男,浙江诸暨人,北京交通大学光波技术研究所博士研究生,主要从事光纤通信、特种光纤等方面的研究。E-mail: fyj.youth@263.net

收稿日期: 2003-08-11; 收到修改稿日期: 2004-10-12

用受到了极大的限制,是实用化的最大障碍。要获得稳定单一偏振态的激光输出,在以前的大部分实验中基本上采用非保偏的掺铒光纤加偏振控制器的方法来实现,这种方法简单,但是由于非保偏掺铒光纤的双折射极容易受到环境的扰动,因此只能维持短时的偏振态稳定。另一种,能从根本上解决问题的方案就是采用保偏掺铒光纤并结合起偏器的结构。本文同时对高数值孔径的双芯光纤双折射特性进行了研究。

2 理论分析

2.1 几何双折射

采用超格子正交函数法和传统的耦合理论方

法^[10]比较分析了双芯光纤中的几何双折射。超格子正交函数法由全矢量耦合波动方程得到关于传输常量和模场展开系数的特征方程,来分析光纤的模式特征^[11,12]。通过数值计算,可以得到双芯光纤中各个模式的模场分布、强度分布及各个模式的传输常量。采用这种方法计算得到了双芯光纤的模场分布见图1,双芯光纤中传输着两个超模:偶模和奇模,传输常量分别为 β_+ 和 β_- ,模式1和模式2对应于偶模的 x 偏振模和 y 偏振模,传输常量为 β_+^x 和 β_+^y ,模式3和模式4对应于奇模 x 偏振模和 y 偏振模,传输常量为 β_-^x 和 β_-^y 。将 $\Delta n_+ = \frac{\lambda}{2\pi}(\beta_+^x - \beta_+^y)$ 定义为偶模几何双折射, $\Delta n_- = \frac{\lambda}{2\pi}(\beta_-^x - \beta_-^y)$ 为奇模几何双折射。

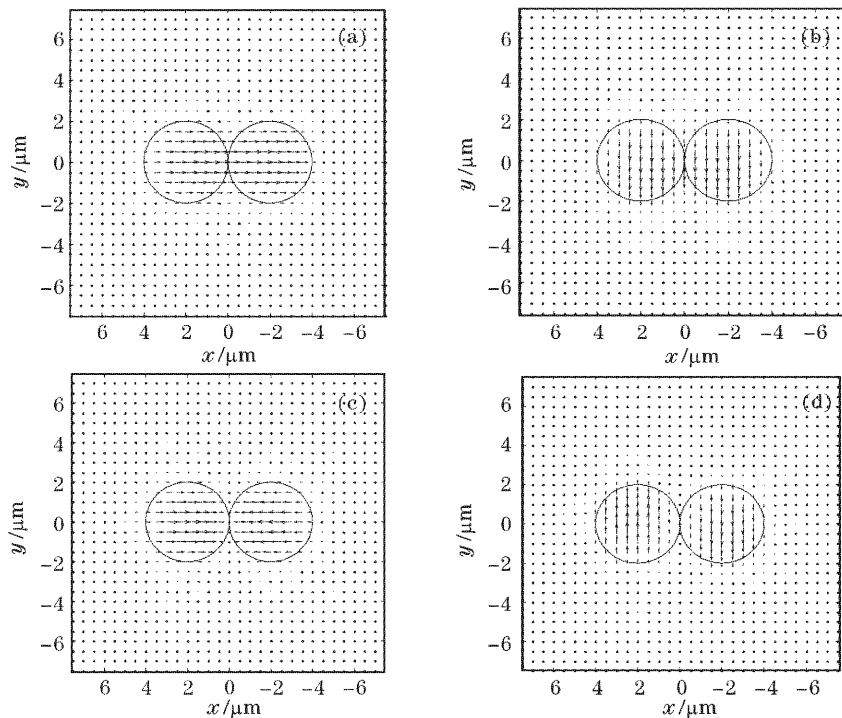


图1 双芯光纤的正规模式分布。(a) 模式1, (b) 模式2, (c) 模式3, (d) 模式4

Fig. 1 Normal modes distribution of the twin-core fiber. (a) Mode 1, (b) mode 2, (c) mode 3, (d) mode 4

双芯光纤的几何双折射由结构参量光纤芯半径 a 和纤芯之间的距离 d 及光纤的相对折射率差 Δ 决定。利用超格子正交函数法,计算了光纤的相对折射率差 $\Delta=0.015$ 时,不同光纤芯径下,几何双折射随归一化纤芯间距 $s=d/a$ 的变化规律,并与用耦合模理论计算的结果进行了比较(图2)。根据耦合模理论,双芯光纤的偶模传输常量之差有以下解析形式^[13]:

$$\beta_+^x - \beta_+^y = \Delta^2 \beta \frac{4U^2 W}{V^4} \frac{K_0(W)}{K_1(W)} \times \left[\frac{I_1(W)}{I_2(W)} - \frac{I_2(W)}{K_0(W)} \right] K_0(Ws), \quad (1)$$

式中 U, W 分别是纤芯和包层的归一化传输常量, β 是单个纤芯时的传输常量, I_1, I_2, K_0, K_1 分别为第一类和第二类变性贝塞尔函数, $V = (2\pi/\lambda)aNA$ 是归一化频率, $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$ 是纤芯的数值孔径。再由 $\Delta n = (\lambda/2\pi)(\beta_+^x - \beta_+^y)$ 得到了双芯光纤的几何双折射。图2(a)为利用超格子正交函数法计算的几何双折射随 s 变化的结果,纤芯越小,纤芯间距越小,双折射越高。与图2(b)耦合模计算的结果基本一致,利用耦合模方法计算时,当纤芯半径由 $1.5 \mu\text{m}$ 继续减小到 $1 \mu\text{m}$ 时,双折射变小,与用利用超格子正交函数法计

算的结果相反；同时，图 2(a)中的变化趋势更快。两种计算方法得到的几何双折射存在一定的差异，由于耦合模理论中，认为两个场是独立的，在双芯靠近时

这个假定就不成立，因此在双芯靠得很近时，用超格子正交函数法计算的结果更准确，当两个纤芯离得远时，采用耦合模理论得到的结果更准确。

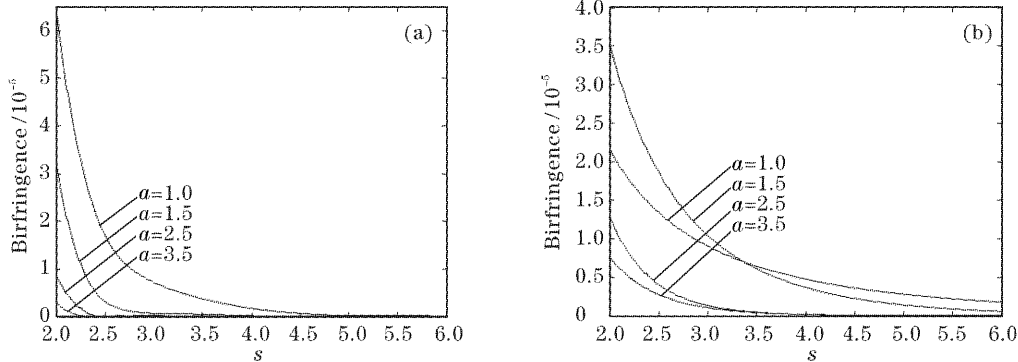


图 2 根据超格子正交函数法(a)和耦合模理论(b)计算的双芯光纤几何双折射随 s 变化的结果，参量： $\Delta=0.015$

Fig. 2 Geometrical birefringence of twin-core fiber varies with s calculated by super cell lattice orthogonal function method (a), and couple mode theory (b), parameters: $\Delta=0.015$

光纤纤芯半径 a 不变，改变光纤的相对折射率差 Δ ，可以得到几何双折射与相对折射率差之间的关系。图 3 是 $a=1.5 \mu\text{m}$ ，相对折射率差 Δ 为 0.01, 0.015, 0.02 时，几何双折射随 s 变化的规律。可见相对折射

率差 Δ 越大，双芯光纤的几何双折射越高。双芯光纤

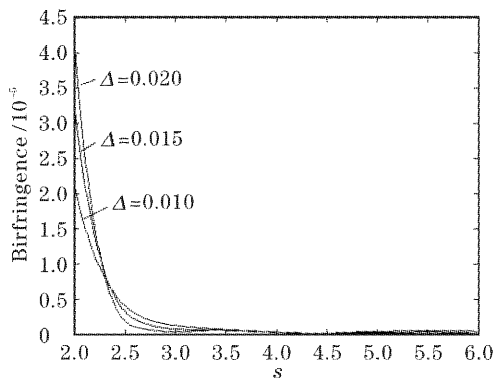


图 3 根据超格子正交函数法计算的双芯光纤几何双折射随 s 归一化距离变化的结果

Fig. 3 Geometrical birefringence of twin-core fiber varies with s calculated by super cell lattice orthogonal function method

率差 Δ 越大，双芯光纤的几何双折射越高。双芯光纤

2.2 椭圆双芯光纤的双折射

由以上的研究发现，双圆芯光纤的几何双折射，在纤芯直径以 $3 \mu\text{m}$ ，相对折射率差为 0.015，即 $NA=0.25$ 为例，两个纤芯在靠近时，利用超格子正交函数法得到双折射为 3.2×10^{-5} ，利用(1)式得到的双折射为 3.5×10^{-5} 。如果要获取大的双折射，可以设计纤芯为椭圆结构，利用超格子正交函数法计算得到此时双折射可以达到 10^{-4} 量级。椭圆双芯结构分两种，如图 4 所示，椭圆长轴和短轴的比为 2:1，双椭圆芯光纤的几何尺寸 $a=1.5 \mu\text{m}$ ，相对折射率差 $\Delta=0.015$ ，图 5 是两种椭圆双芯光纤双折射随归一化纤芯间距的变化规律。椭圆双芯光纤的双折射与普通双芯光纤相比，得到了很大的提高，在如图 4(a)的结构中，双芯在相互接近时，双折射达到 1.13×10^{-4} ，并且随着纤芯之间的距离增加，双折射下降比普通双芯光纤要缓慢得多。而图 4(b)的情况下，椭圆双芯光纤的双折射开始随纤芯间距增加有所增加，逐渐保持较高的双折射，而基本不随纤芯

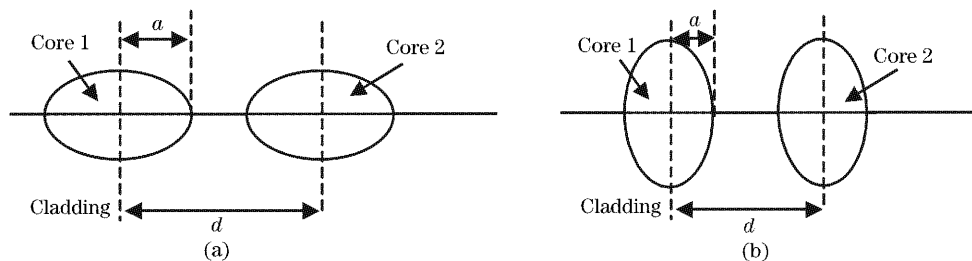


图 4 双椭圆芯光纤的结构。(a) 短轴平行，(b) 长轴平行

Fig. 4 Structure of twin-elliptical cores fiber. (a) minor axis parallel, (b) major axis parallel

间距变化而变化。当继续提高光纤的数值孔径, $\Delta=0.02$, 即 $NA=0.29$ 时, 几何双折射可以提高到最大 1.6×10^{-4} 。

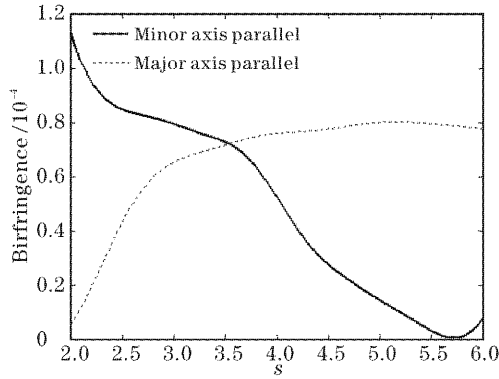


图 5 椭圆双芯光纤的几何双折射随归一化距离 s 变化的情况

Fig. 5 Geometrical birefringence of twin-elliptical cores fiber varied with normalized distance s

2.3 应力双折射

双芯光纤从结构上看, 类似于椭圆芯光纤, 应力分布不均匀, 同时高数值孔径双芯光纤通过高掺锗来实现, 此时纤芯具有很高的热膨胀系数, 从而在双芯光纤中引入了较强的应力双折射。双芯光纤的横截面形状见图 6。

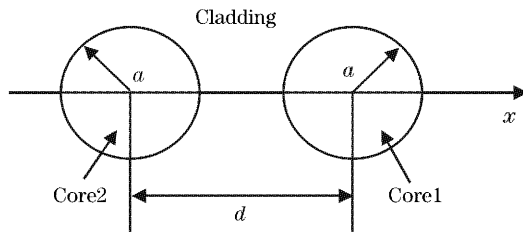


图 6 双芯光纤的结构

Fig. 6 Structure of the twin-core fiber

根据弹性力学理论, 可以得出双折射和应力差 $(\sigma_x - \sigma_y)$ 的关系:

$$B(r, \theta) = c(\sigma_x - \sigma_y) = c(\sigma_r - \sigma_\theta) \cos 2\theta - 2c\sigma_\theta \sin 2\theta. \quad (2)$$

为了分析双芯光纤的应力分布, 引入热位移势函数 ψ , 这个函数满足标量泊松方程

$$\nabla^2 \psi = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha(r, \theta) T, \quad (3)$$

其中 ν 为泊松比, T 为室温与玻璃软化点温度之差, $\alpha(r, \theta)$ 为热膨胀系数分布。设纤芯的热膨胀系数为 α_1 、包层的热膨胀系数为 α_2 。为了得到热位移势函数, 在 (3) 式中用 $(\alpha_1 - \alpha_2)$ 替代纤芯中的 α 。 ψ_1 是纤芯的热位移势函数, ψ_2 是包层的热位移势函数, 它

们在相应的区域满足泊松方程:

$$\nabla^2 \psi_i = \frac{1+\nu}{1-\nu} (\alpha_i - \alpha_2) T, \quad (4)$$

则在纤芯区域, ψ_1 满足

$$\nabla^2 \psi_1 = \frac{1+\nu}{1-\nu} (\alpha_1 - \alpha_2) T = \delta T, \quad (5)$$

求解 (4) 式, 可以得到方程的特解 ψ_1 和通解 Φ , 将整个双芯光纤截面上的 ψ_1 和代入求应力分量 $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$ 的公式中:

$$\sigma_r = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (\psi_1 + \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\psi_1 + \Phi) \right], \quad (6a)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (\psi_1 + \Phi), \quad (6b)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\psi_1 + \Phi) \right], \quad (6c)$$

可以得到在整个双芯光纤截面上任一点的应力分布。

E 是杨氏模量, $\delta = \frac{1+\nu}{1-\nu} (\alpha_1 - \alpha_2)$ 。利用双芯光纤的参数: $a = 1.5 \mu\text{m}$, $\Delta = 0.015$, 由相对折射率差得到锗的摩尔分数为 14.5%, 并利用文献 [14] 中的热膨胀系数, 得到纤芯和包层的热膨胀系数 $(\alpha_1 - \alpha_2) = -8.85 \times 10^{-4}$, $\nu = 0.186$, 杨氏模量 $E = 7830 \text{ kg/mm}^2$, 光弹系数 $c = 3.36 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$ 。根据 (2) 式, (6) 式计算得到双芯接近时的应力双折射为 7.15×10^{-5} 。

双芯光纤的几何双折射和应力双折射产生的快慢轴是一致的, 将两者线性叠加, 得到双芯接近时的总双折射为 1.065×10^{-4} 。

3 实验与结果

采用 MCVD 法结合溶液掺杂法制作了均匀性好的掺铒光纤预制棒, 掺铒光纤预制棒制作完成之后, 拉丝一小段, 测试掺铒光纤各种性能之后, 再加工剩余的单芯预制棒, 并制作出双芯掺铒光纤预制棒, 掺铒的两个芯设计成对称结构。在双芯掺铒预制棒制作完成后, 进行拉丝得到了双芯掺铒光纤, 采用 EXFO 公司的 NR9200 的折射率测试仪分析了双芯光纤的结构参量、折射率分布和模场分布, 得到双芯光纤的纤芯直径为 $3 \mu\text{m}$, 纤芯中心距离为 $4.5 \mu\text{m}$, 一维折射率分布和二维折射率分布见图 7, 测试波长为 674.8 nm 。纤芯 1 的折射率为 1.477, 纤芯 2 的折射率为 1.478, 包层折射率为 1.456。利用塞耳迈耶尔公式得到 1550 nm 处的 SiO_2 的折射率为 1.444, 则纤芯 1 的折射率为 1.465, 纤芯 2 的折射率为 1.466, 实验测试得到的双芯折射率略有不同。数值孔径分别为

$NA_1=0.247, NA_2=0.253$, 相对折射率差 $\Delta=0.015$ 。

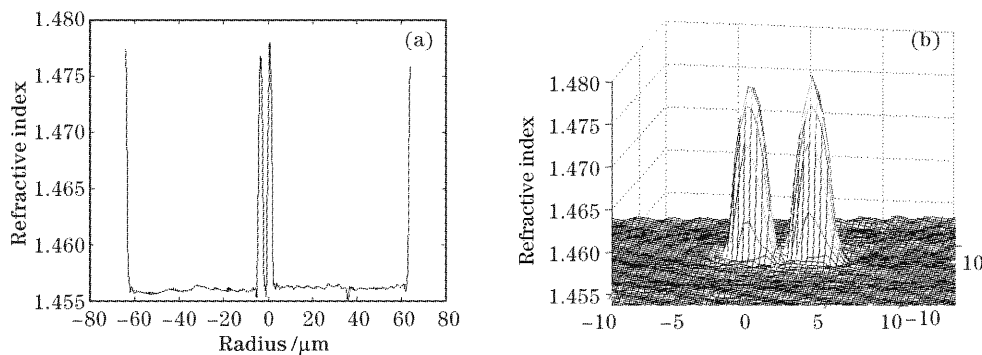


图 7 双芯光纤的折射率分布。(a) 一维情形, (b) 二维情形

Fig. 7 The refractive index distribution of twin-core fiber. (a) One-dimensional, (b) two-dimensional

保偏光纤的双折射测量,分为直接测量和间接测量,间接测量方法可以通过偏振模色散与双折射之间的关系^[15]得到,也可以通过在保偏光纤上写入光纤光栅,由光纤光栅反射谱的中心波长的差值得到快慢轴的双折射^[16]。本文是通过测量双芯光纤的偏振模色散间接计算双折射,利用 Agilent 8509B 的琼斯矩阵法测量了双芯光纤的偏振模色散,大小为 0.28 ps/m ,由文献^[15]可以得到双芯光纤的双折射为 8.4×10^{-5} 。

4 结 论

超格子正交函数法可以分析双芯光纤的几何双折射,特别是它可以分析椭圆双芯的几何双折射,是一种非常有效的数值分析方法。双芯光纤具有较高的双折射,包括几何双折射和应力双折射,要获得较高的几何双折射,就需要使双芯之间的距离很小,而要获取较高的应力双折射,就应具有较高的掺锗量。从实验结果得到,具有高数值孔径的掺锗双芯光纤具有较高的双折射,可以用于单偏振输出的光纤激光器的制作中。

参 考 文 献

- 1 R. I. Laming, J. D. Minelly, L. Dong *et al.*. Twincore erbium-doped fibre amplifier with passive spectral gain equalization[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(6): 509~510
- 2 Haijuan Chen, Hong Li, Xianglin Yang. Twin-core fiber amplifier in ultra-high-bit-rate optical transmission system[C]. *ICCT '98*, October 22~24, S25
- 3 J. R. Costa, P. M. Ramos, C. R. Paiva *et al.*. Numerical study of passive gain equalization with twin-core fiber coupler amplifiers for WDM system[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(12):

1553~1561

- 4 R. Hereth, G. Schiffner. Broad-band optical directional couplers and polarization splitter[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(6): 925~930
- 5 J. W. Arkwright, B. Gillhoff, S. J. Hewlett *et al.*. Optical-to-electrical wavelength demultiplexing detector: Design, fabrication and analysis[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(4): 534~541
- 6 P. Pavel, J. Kanka. Erbium-doped twin-core fibre narrow-band filter for fibre lasers[J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 2001, **33**: 571~581
- 7 D. Gauden, D. Mechin, C. Vaudry *et al.*. Variable optical attenuator based on thermally tuned Mach-Zehnder interferometer within a twin core fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**: 213~216
- 8 Pedro M. Ramos, Carlos R. Paiva. All-optical pulse switching in twin-core fiber couplers with intermodal dispersion[J]. *J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(6): 983~989
- 9 Xia Jiangzhen, Cai Haiwen, Ren Hong *et al.*. Study on output characteristics of Erbium doped fiber ring lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 823~827 (in Chinese)
- 夏江珍, 蔡海文, 任虹等. 掺铒光纤环形激光器输出特性的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 823~827
- 10 A. W. Snyder, J. D. Love. *Optical Waveguide Theory* [M]. London, U. K.: Chapman & Hall, 1983
- 11 Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin. Super lattice method for photonic crystal fibres[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(9): 980~991
- 12 Ren Guobin, Wang Zhi, Lou Shuqin. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibres[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(11): 1310~1321
- 13 A. Ankiewicz, A. W. Snyder, X. H. Zheng. Coupling between parallel optical fiber cores-critical examination[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(9): 1317~1323
- 14 Luc B. Jeunhomme. *Single Mode Fiber Optics* [M]. New York and Base, 1983
- 15 N. Shibata, K. Okamoto, M. Tateda *et al.*. Modal birefringence and polarization mode dispersion in single-mode fibers with stress-induced anisotropy [J]. *J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(6): 1110~1115
- 16 Xia Li, Li Xuhui, Yin Yuzhe. Study of writing fiber Bragg grating into birefringent fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1004~1007 (in Chinese)
- 夏历, 李翔辉, 殷玉喆等. 在保偏光纤上制作光纤光栅的应用研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 1004~1007