

# 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究

姜 暖<sup>1</sup> 李智忠<sup>2</sup> 杨华勇<sup>1</sup> 胡永明<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)  
<sup>2</sup> 海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

**摘要** 理论分析了保偏光纤双折射效应,应用有限元法建立了保偏光纤的三维模型,得到了其横截面上的应力分布及归一化的双折射参数。选择 3 种全光纤构成的纯光学系统进行对比拍长测试实验,实验结果和理论模型计算结果十分吻合,并对比研究了几种测试方法的优缺点。选定一种光路结构简单有效的双折射测试系统,对高双折射光子晶体光纤进行测试,测得了其归一化的双折射参数,并计算得其拍长约为 1.2 mm。研究结果对不同复杂结构保偏光纤的建模理论分析和拍长性能测试及高双折射光子晶体光纤设计制作后的性能测试有一定的实用价值。

**关键词** 光纤光学;保偏光纤;有限元法;全光纤系统;拍长测试;高双折射光子晶体光纤

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0706003

## Birefringence Analysis of Polarization Maintaining Fiber and Research on Characteristic of All-Fiber Beat-Length Experimental Systems

Jiang Nuan<sup>1</sup> Li Zhizhong<sup>2</sup> Yang Huayong<sup>1</sup> Hu Yongming<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>2</sup> Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** The principle of polarization maintaining fiber (PMF) is analyzed and a three-dimensional model is established by utilizing the finite element method (FEM). The stress distribution and normalized birefringence are obtained through this model. Three pure-optical beat-length measuring systems are carried out for contrastive research and the advantages and disadvantages are described. Experimental results are in good agreement with the theoretical results. Then one simple and effective method to test the beat-length of high-birefringence photonic crystal fiber (Hi-Bi PCF) is chosen and the results indicate that its beat-length is about 1.2 mm. This research provides an effective theoretical method for the analysis of PMF and a convenient experimental system for the beat-length testing of complex structure PMF and Hi-Bi PCF.

**Key words** fiber optics; polarization maintaining fiber; finite element method; all-fiber system; beat-length testing; high birefringence photonic crystal fiber

**OCIS codes** 060.2310; 060.2420; 120.4820

## 1 引 言

保偏光纤对沿其特征轴传输的线偏振光具有偏振保持能力,其抗偏振衰落性能在光纤通信和光纤传感系统得到广泛应用<sup>[1~3]</sup>。保偏光纤分为高双折

射和低双折射两大类,通常所说的保偏光纤为高双折射保偏光纤,其两正交模式的传播常数相差较大,若注入光沿某一光轴方向线偏振,则可以保持其偏振态在光纤中传播,若注入光沿一其他任意角度线

收稿日期: 2012-01-04; 收到修改稿日期: 2012-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(60901054)资助课题。

作者简介: 姜 暖(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤传感特别是光纤光栅、光纤器件等方面的研究。

E-mail: nuan0202@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术特别是光纤偏振技术、相干检测技术以及光纤水听器、光纤陀螺技术等方面的研究。E-mail: sdss@21cn.com

偏振,则偏振态会变化,变化一个周期所经过的长度就是保偏光纤拍长,由两正交模式的传播常数决定,因此研究准确方便的拍长测量方法十分重要。现已有多种方法测量保偏光纤拍长<sup>[4]</sup>,如剪断法、偏振时域反射法、扭转法、后向散射法即直接观察法、磁光调制法<sup>[5,6]</sup>和动态压力法<sup>[7]</sup>等,但大多具有破坏性且测试方法复杂、精度不高。

本文通过建立保偏光纤的三维有限元模型,仿真计算不同结构参数保偏光纤的归一化双折射  $B$  (以下简称双折射  $B$ ),理论上仿真求得其拍长,进而采用 3 种较为简单的纯光学方法,测试光路为全光纤构成、不含任何体光学元件,对其拍长进行实验测试,理论分析和实验结果一致。对比分析 3 种测试方法的优缺点,进而选用最优方法简单精确地测得了高双折射光子晶体光纤的拍长。

## 2 保偏光纤模型理论分析

以熊猫型保偏光纤为例,其双折射主要是应力区的应力双折射<sup>[8~10]</sup>,截面结构如图 1 所示,几何结构参数:纤芯半径  $a=3.5 \mu\text{m}$ ,包层半径  $b=62.5 \mu\text{m}$ ,应力区半径  $r=18 \mu\text{m}$ ,应力区和纤芯中心间的距离  $d=27.5 \mu\text{m}$ 。

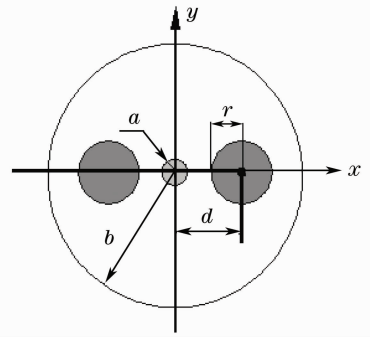


图 1 熊猫型保偏光纤截面结构

Fig. 1 Cross-section diagram of Panda fiber

计算所用的熊猫光纤材料参数:猫眼热膨胀系数  $\alpha_3 = 24.94 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,杨氏模量  $E_3 = 6.5 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,泊松比  $\nu_3 = 0.201$ 。其他材料参数的取值:纤芯和包层杨氏模量  $E_1 = E_2 = 7.83 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,泊松比  $\nu_1 = \nu_2 = 0.186$ ,纤芯热膨胀系数  $\alpha_1 = 14.85 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,包层热膨胀系数  $\alpha_2 = 5.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ,应力区软化点与室温温度差  $\Delta T = -1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

应用有限元法建立几何模型,对材料的物理参数赋值后进行网格细分,图 2(a)是划分网格后的截面示意图,图 2(b)是纤芯和应力区的局部放大图,应用此模型计算得到的  $x$  和  $y$  方向的应力和双折射分布如图 3 所示。

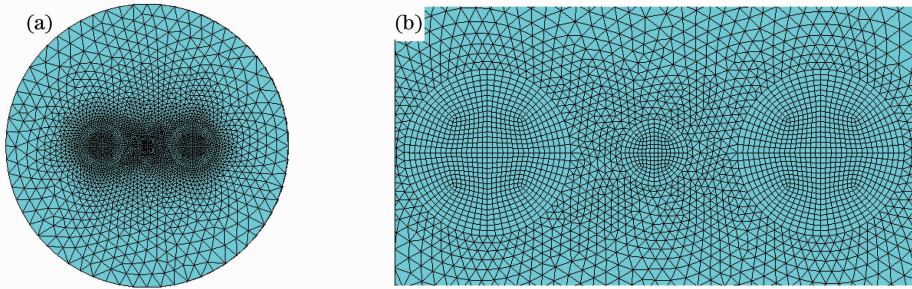


图 2 截面网格细分示意图。(a)横截面细分网格;(b)中心区域局部放大图

Fig. 2 Finite element model of meshing. (a) Cross-section of meshing; (b) zoom in the region of center section

根据计算结果,纤芯中心的应力分量分别为  $\sigma_x = 9.713 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,  $\sigma_y = -3.904 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,计算可得纤芯中心处的双折射  $n_B = 4.575 \times 10^{-4}$ ,双折射数值为正值,表明  $x$  方向是慢轴, $y$  方向是快轴。由公式  $B = 1550 \times 10^{-6}/n_B$  计算得保偏光纤拍长  $L_B$  约为  $3.38 \text{ mm}$ 。

## 3 3 种光学测试实验对比分析

### 3.1 扫描波长法测量

图 4 为采用波长扫描法进行双折射测量的光路图<sup>[11]</sup>。从窄带可调谐光源发出的光经过起偏器  $P_1$

入射到待测保偏光纤,激励起两正交偏振模式  $E_x$  和  $E_y$ ,对应的传播常数分别为  $\beta_x$  和  $\beta_y$ 。经过长度为  $L$  的被测光纤后,经检偏器  $P_2$  到探测器 D。

设经过起偏器  $P_1$  输出光的复振幅为  $E_0$ ,由于起偏器  $P_1$  与被测光纤夹角为  $\theta_1$ ,激励起的两个正交偏振模的复振幅可表示为

$$E_{1x}(z) = E_0 \cos \theta_1 \exp(i\beta_x z), \quad (1)$$

$$E_{1y}(z) = E_0 \sin \theta_1 \exp(i\beta_y z). \quad (2)$$

未通过检偏器  $P_2$  前两复振幅变为

$$E_{2x}(z) = E_0 \cos \theta_1 \exp(i\beta_x L), \quad (3)$$

$$E_{2y}(z) = E_0 \sin \theta_1 \exp(i\beta_y L). \quad (4)$$

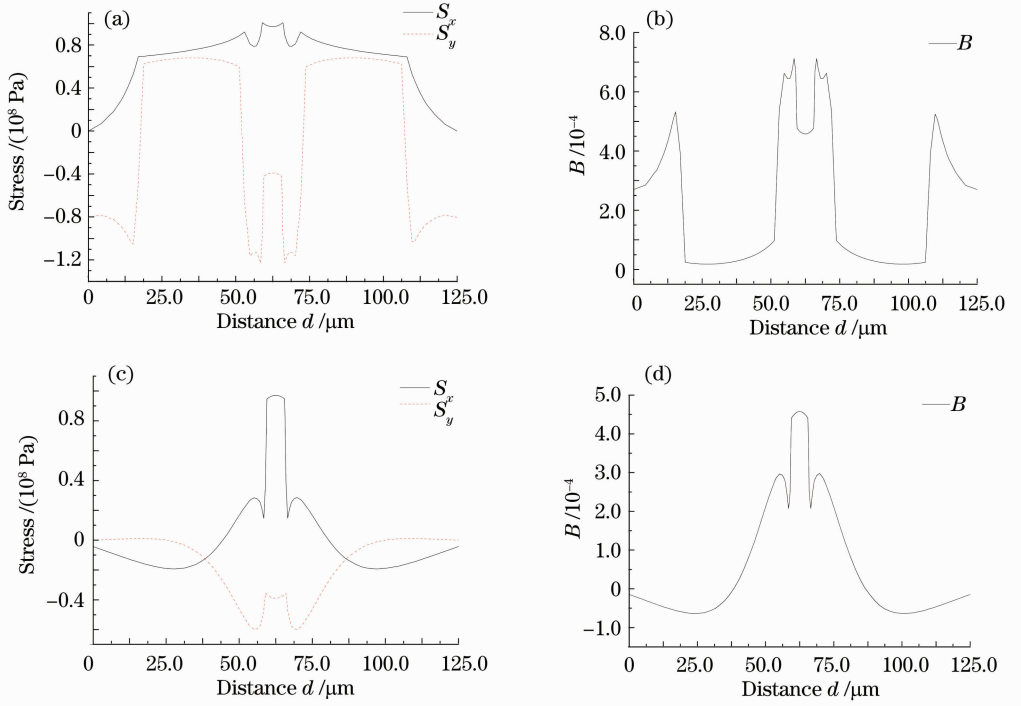


图3  $x$  和  $y$  方向的应力和双折射分布示意图。(a)沿  $x$  轴方向的应力分布图；(b)沿  $x$  轴方向的双折射分布图；(c)沿  $y$  轴方向的应力分布图；(d)沿  $y$  轴方向的双折射分布图

Fig. 3 Stress distribution and birefringence diagram. (a) Stress distribution along  $x$  axis; (b) birefringence along  $x$  axis; (c) stress distribution along  $y$  axis; (d) birefringence along  $y$  axis

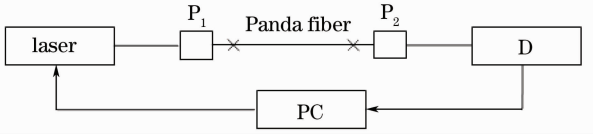


图4 波长扫描法测量系统

Fig. 4 Sweep laser measuring system

经检偏器  $P_2$  后相干输出振幅为

$$E = E_{2x} \cos \theta_2 + E_{2y} \sin \theta_2 = E_0 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \exp(i\beta_x L) + E_0 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \exp(i\beta_y L), \quad (5)$$

其中  $\theta_2$  为检偏器  $P_2$  与被测光纤的夹角。设  $I_0 = |E_0|^2$ ，则经检偏器  $P_2$  到探测器 D 的光强为

$$I = |E|^2 = |E_0 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \exp(i\beta_x L) + E_0 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \exp(i\beta_y L)|^2. \quad (6)$$

利用  $\exp(i\beta_x L) = \cos(\beta_x L) + i \sin(\beta_x L)$ ，然后求模平方即得

$$I = I_0 (\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2) + 2I_0 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\Delta\phi), \quad (7)$$

式中  $\Delta\phi = (\beta_x - \beta_y)L = 2\pi LB/\lambda$ ， $B = (\beta_x - \beta_y)/k = (\beta_x - \beta_y)/(2\pi/\lambda)$ 。

通过(6)式可以看出，经过检偏器  $P_2$  输出的光强实际上是待测光纤中两个偏振方向分量在  $\theta_2$  方

向相干涉的结果，因此  $\theta_1$  和  $\theta_2$  的大小影响到干涉条纹的可见度  $k$ ：

$$k = \frac{2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}. \quad (8)$$

当  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$  时，干涉条纹的可见度达到最大， $k=1$ ，此时(7)式可表示为

$$I = \frac{1}{2} I_0 + \frac{1}{2} I_0 \cos(2\pi BL/\lambda). \quad (9)$$

如图5所示，输出波长  $\lambda$  的变化使输出光强按余弦函数变化，探测器端的光功率值随着激光器输出波长呈周期性变化，且周期不是常数而是一个随波长变化的值，可得

$$B = \frac{1}{L} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (10)$$

控制可调谐窄带光源输出不同波长，在探测器端就得到不同光强值，根据(10)式就可以确定光纤的双折射值。采用图4所示的实验方案进行光纤双折射的测量。所用光源为 NetTest 公司生产的 TUNICS-plus10 可调谐窄带激光器，波长调谐范围为 1490~1630 nm，输出最大光功率 20 mW，最小可设扫描步长 1 pm。实验中波长扫描范围为 1543~1553 nm，扫描步长为 0.01 nm，输出光功率为 1 mW。起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_2$  采用磨抛型保偏光

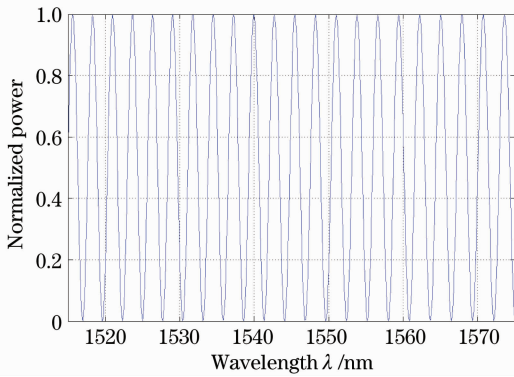


图 5 输出光功率随激光器输出波长的变化关系  
Fig. 5 Output power versus laser wavelength

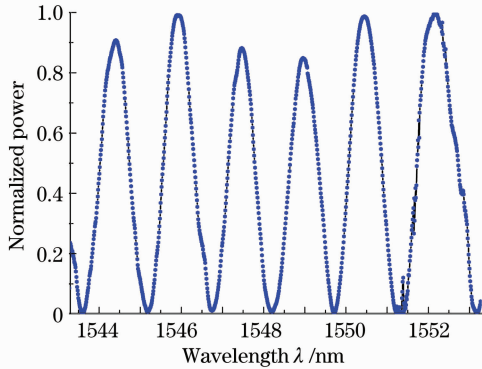


图 6 保偏光纤的扫描结果

Fig. 6 Sweep result of polarization maintaining fiber

纤偏振器,消光比  $\eta=30$  dB,损耗小于 0.5 dB。

图 6 为对长度  $L=3$  m 的保偏光纤进行波长扫描的结果,横坐标为波长,纵坐标为归一化的光功率。数据拟合得双折射  $B=5.0381 \times 10^{-4}$ ,在 1550 nm 处的拍长为 3.1 mm,与厂家提供的拍长 3.0 mm 基本吻合。扫描光源法的优点是操作简单、精度高,只需一台可调谐激光器、光电探测采集系统和光纤偏振器,但测试系统对激光器性能要求高,最好是高精度大范围可调谐窄线宽激光器,其输出波长的线宽、扫描范围和调谐精度直接决定了拍长测量精度。此外采集后的数据需要进行曲线拟合,计算相对复杂,拟合方法对测量精度也有影响。

### 3.2 宽谱光源干涉法测量

图 7 是设计的宽谱光源(ASE)干涉法拍长测试光路图<sup>[12,13]</sup>,光路为全光纤构成,无任何体光学元件,避免了外界环境的影响。宽谱光源输出光经起偏器  $P_1$  进入待测保偏光纤,经过长度为  $L$  的待测光纤后,经检偏器  $P_2$ ,光谱仪(OSA, Q8384 型,分辨率 0.02 nm)在输出端监测干涉条纹,由于干涉理论可知

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}BL = 1, \quad (11)$$

式中  $\Delta\lambda$  为干涉条纹两相邻极值间隔,因此可以计算特定波长处的双折射,由拍长  $L_B = \frac{\lambda}{B} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}L$  可得保偏光纤的拍长。



图 7 干涉法测量系统

Fig. 7 Schematic diagram of interference experimental system

将保偏光纤平直放置,采用图 7 所示的实验方案进行双折射测量。所用光源为宽谱光源,输出光功率在 0~17 dBm 可调。起偏器  $P_1$  和检偏器  $P_2$  采用磨抛型保偏光纤偏振器,消光比  $\eta=30$  dB,损耗小于 0.5 dB。

图 8 为对长度  $L=3$  m 的保偏光纤进行测试的结果,横坐标为波长,纵坐标为光功率。由(11)式可得光纤的双折射  $B=5.2251 \times 10^{-4}$ ,在 1550 nm 处的拍长为 3.0 mm,这与厂家提供的拍长完全吻合。宽谱光源干涉法的优点是简单易行,只需宽谱光源、光谱仪及光纤偏振器,通过光谱仪直接测量记录光谱变化并简单计算,即可精确测量相应波长处的拍长,且宽谱光源具有较高性能的可调谐激光器成本大大降低。缺点是测量精度由光谱仪的分辨率决定,光谱仪一般价格较贵且体积较大,不适合野外实验,仅适用于实验室等环境。

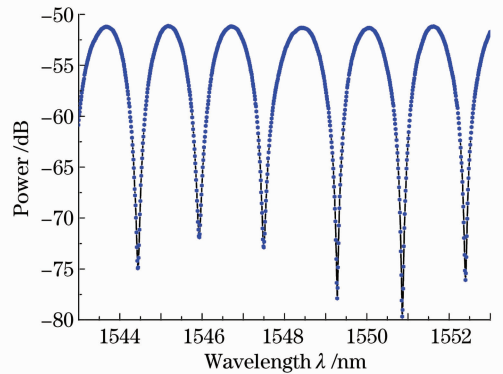


图 8 保偏光纤的输出光谱

Fig. 8 Interference result of polarization maintaining fiber

### 3.3 光纤光栅法拍长测量

将待测保偏光纤放入载氢容器,载氢容器加压 11 MPa,大约 3 周后取出,采用 248 nm 的 KrF 准分子激光器应用相位掩模法写入光栅,写入光栅长度 10 mm,设定合适的准分子激光器脉冲能量和曝光时间。图 9 是写制的光纤光栅反射光谱。

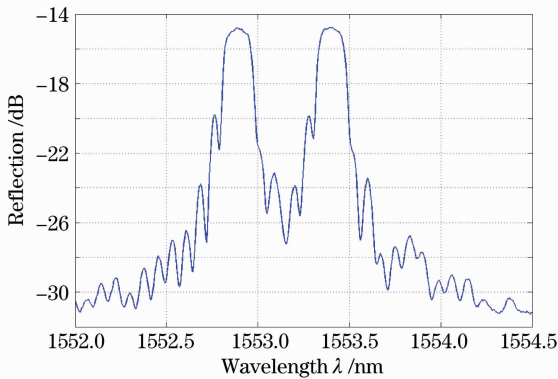


图9 保偏光纤光栅反射光谱

Fig. 9 Reflection spectrum of polarization maintaining fiber grating

通过在保偏光纤上写制光纤光栅后测量两个反射峰值波长间距<sup>[14]</sup>,计算得其在 1550 nm 处的拍长为 3.2 mm。光纤光栅法的优点是测试光路比前两种更为简单,用光纤光栅解调仪测量保偏光纤光栅的反射光谱,利用两个峰值波长经过简单计算即可得出保偏光纤拍长,缺点是光栅制作工艺复杂、周期较长。实验中保偏光纤光栅是将保偏光纤低温高压载氢 3 周后,基于相位掩模工艺采用 248 nm 准分子激光器光刻形成,由于光栅写作过程中的多种工艺因素,如激光器脉冲能量、曝光时间、光纤夹持所受的拉力大小等会使实际写入光栅中心波长出现小的偏移量,因此此种方法测量精度不高。

### 3.4 高双折射光子晶体光纤双折射测试结果

光子晶体光纤的出现,使光纤特性不单纯依赖于材料特性,通过灵活的截面结构设计产生高双折射。有大量的专家学者对其截面结构进行了仿真计算,通过合理设计其双折射较普通保偏光纤可提高一个数量级<sup>[15~17]</sup>。以武汉长飞光纤光缆有限公司

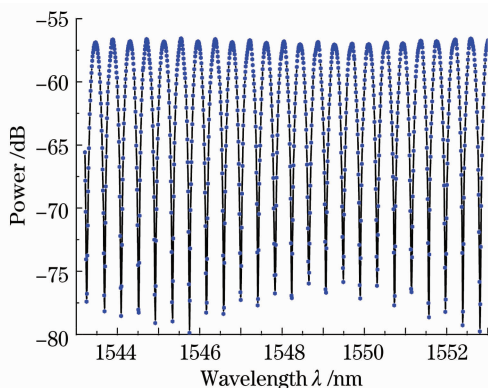


图10 高双折射光子晶体光纤的输出光谱

Fig. 10 Interference result of high-birefringence photonic crystal fiber

提供的高双折射光子晶体光纤为研究对象,选用简单精确的宽谱光源干涉法测量,图 10 是对长度  $L = 5$  m 的高双折射光子晶体光纤的测试结果,实验测得其双折射值  $B = 1.2 \times 10^{-3}$ ,在 1550 nm 处的拍长为 1.3 mm。

## 4 结 论

保偏光纤因其抗偏振衰落性能在光纤陀螺等领域得到了广泛应用,它的保偏性能是能否被应用的一个重要指标。本文首先应用有限元法建立了熊猫保偏光纤的三维模型,理论上计算了其横截面上的应力分布曲线及双折射参数。结合现有的双折射测试方法,选择扫描波长法、宽谱光源干涉法、光纤光栅法搭建全光纤系统进行对比测试,测得了保偏光纤的双折射参数,与理论计算结果吻合。对比分析了 3 种方法各自的优缺点:扫描光源法精度高,但它对光源性能要求较高且需要做曲线拟合计算;光纤光栅法简单直观,但是光栅写作过程中的不确定因素较多导致精度不高;宽谱光源干涉法简单易行,通过光谱仪直接测量记录光谱变化并简单计算,即可精确测量相应波长处的拍长,测量精度由光谱仪的分辨率决定。光子晶体光纤的出现赋予了光纤许多以前没有的特性,如无截止单模传输、高双折射和弯曲损耗小等,根据不同的需要可以方便地设计其截面结构参数。许多学者通过不同的截面设计提出了更高双折射的保偏光子晶体光纤,但大多是理论分析而未加实验验证。本文最终确定了一种光路结构简单有效的双折射测试系统,并应用此系统对高保偏光子晶体光纤进行测试,测得了其双折射参数。本文的研究结果对不同复杂结构保偏光纤的建模理论分析和拍长性能测试具有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 J. Noda, K. Okamoto, Y. Sasaki. Polarization-maintaining fibers and their applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(8): 1071~1089
- 2 F. I. Akers, R. E. Thompson. Polarization-maintaining single-mode fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(10): 1720~1721
- 3 Lin Huizu, Yao Qiong, Hu Yongming. Study on 90° docking error control in polarization maintaining fiber resonator of resonant fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2864~2868
- 林惠祖, 姚琼, 胡永明. 谐振式光纤陀螺保偏光纤谐振腔 90° 对接误差控制研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2864~2868
- 4 Hu Dongmei, Li Bingxin. Beat length measurement of polarization maintaining fiber [J]. *Optics Communication Technology*, 2006, **30**(10): 61~63
- 胡冬梅, 李炳新. 保偏光纤拍长的测量方法[J]. *光通信技术*, 2006, **30**(10): 61~63

- 5 M. R. Khan, D. I. Halliaay. Measurement of beat length in Hi-Bi fiber using Faraday magneto-optic effect [C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1996, 241~244
- 6 Shi Zhidong, Bao Huanhuan, Liu Shu. Research on magneto-optic modulation method measuring beat-length of birefringence optical fiber [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(3): 369~372  
石志东, 包欢欢, 柳 树. 磁光调制法双折射光纤拍长测试技术研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(3): 369~372
- 7 R. Calvani, R. Caponi, F. Cisternino *et al.*. Fiber birefringence measurements with an external stress method and heterodyne polarization detection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(9): 1176~1182
- 8 Yan Fengping, Wei Yan, Fu Yongjun *et al.*. Study on the performance of stress area mismatched Panda polarization-maintaining fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **58**(1): 321~327  
延凤平, 卫 延, 傅永军等. 熊猫型保偏光纤中应力区失配对光纤性能影响的研究[J]. *物理学报*, 2000, **58**(1): 321~327
- 9 Li Zhizhong, Hu Yongming, Yang Huayong *et al.*. Finite-element analysis of birefringence in circular-core side-hole fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1013~1018  
李智忠, 胡永明, 杨华勇等. 圆芯型边孔光纤双折射的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1013~1018
- 10 Rongfeng Guan, Xueli Wang, Xuefang Wang *et al.*. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(1): 42~45
- 11 Wang Hanyi, Ren Liyong, Zhang Yani *et al.*. Polarization properties measurement of polarization maintaining fiber based on wavelength-sweeping modulation [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(11): 1336~1339  
王韩毅, 任立勇, 张亚妮等. 基于波长扫描调制法测量保偏光纤的偏振特性[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(11): 1336~1339
- 12 Yuan Libo. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900137  
苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900137
- 13 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Measuring the beatlength of polarization maintaining fiber by broadband light source and conoscopic interference [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(9): 1074~1077  
米 剑, 张春熹, 李 铮等. 利用宽谱光源及偏光干涉测量保偏光纤拍长[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(9): 1074~1077
- 14 Xia Li, Li Xuhui, Yin Yuzhe *et al.*. Study of writing fiber Bragg grating into birefringent fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1004~1007  
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
- 15 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tieying *et al.*. Novel high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206  
方 宏, 娄淑琴, 郭铁英等. 一种新结构高双折射光子晶体光纤[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 16 Zhang Xiaojuan, Zhao Jianlin, Cui Li. Analysis of mode properties of photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1379~1383  
张晓娟, 赵建林, 崔 莉. 一种高双折射光子晶体光纤的模式特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1379~1383
- 17 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

栏目编辑: 谢 婧