

细径保偏光纤自动对轴的仿真与实验

荣伟彬¹ 张伟^{1*} 王乐锋¹ 曹阳² 赵磊² 孙立宁¹

(¹ 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)
² 中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 为了改善细径保偏光纤耦合器的性能, 需要提高保偏光纤偏振轴的检测精度。建立直径为 80 μm 的细径熊猫保偏光纤折射率的数学模型, 对侧面成像方法进行了仿真。结果表明, 平行光透过光纤在侧面聚焦, 光纤图像最大光强的变化与旋转角度以及观测距离有关。当观测距离不变时, 最大光强随光纤旋转角度呈周期性变化。当观测面在透射光线焦距附近时, 根据光纤图像最大光强变化, 能够检测光纤慢轴的位置, 进而提出基于最大光强变化作为特征量的检测方法。结合显微视觉技术建立了实验系统, 该系统采用基于阈值的图像清晰度函数确定检测位置, 将采集的数据进行傅里叶滤波和三次样条拟合, 可确定保偏光纤偏振轴的位置。实验结果表明, 重复检测误差为 0.61° , 可以满足细径保偏光纤耦合器制造要求。

关键词 光纤光学; 细径保偏光纤; 自动对轴; 最大光强; 显微视觉

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1205002

Simulation and Experiment on Automatic Polarization Alignment of Fine Polarization Maintaining Fibers

Rong Weibin¹ Zhang Wei¹ Wang Lefeng¹ Cao Yang² Zhao Lei² Sun Lining¹

*State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China*

² AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract To improve the performance of fine polarization maintaining fiber (PMF) couplers, it is necessary to increase the detection accuracy of polarization axis. The mathematical model of panda PMF index is established, and then the side view method is simulated. From the simulation results, the light is transmitted in the optical fiber and is focused on the other side, and the maximum light intensity of the fiber image is related to the rotation angle and the observation distance. When the observation distance is constant, the maximum value of light intensity changes periodically with the PMF rotation angle. When the observation plane is near the focused one of the transmitted light, the highest light intensity of optical image reaches the maximum value, which is the polarization axis detection parameter of PMF. Based on this, detection method which takes the maximum intensity as the feature is proposed. Combining the micro-vision technology, the polarization axis detection system for fine PMF is designed. The image sharpness function which can confirm the position of the detection plane is proposed. The experimental data are processed using the Fourier filtering method. By fitting the experiment data with the cubic spline method, the panda PMF polarization axis is determined. According to the experimental results, the repetitive detection error is 0.61° , which meets the requirements of PMF coupler manufacturing.

Key words fiber optics; fine polarization maintaining fiber; automatic alignment; maximum light intensity; micro-vision

OCIS codes 060.2310; 040.1880; 150.5758

1 引言

光纤耦合器是用于传送和分配光信号的光纤无

源器件, 是光纤通信及光纤传感领域不可缺少的器件^[1-3]。保偏光纤(PMF)耦合器是应用保偏光纤制

收稿日期: 2013-06-19; 收到修改稿日期: 2013-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(90923041)、长江学者和创新团队发展计划(IRT0915)、中央高校基本科研业务费专项资金(HIT. BRET2. 2010007)

作者简介: 荣伟彬(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微操作技术与装备等方面的研究。

E-mail: rwb@hope.hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zw062003@163.com

作的耦合器,是实现线偏振光耦合、分光以及复用的关键器件,是各种干涉型光纤传感器和相干光通信的关键器件^[4-6]。保偏光纤偏振轴的检测和对准(简称对轴)是保偏光纤耦合器制造过程中的首要问题。对轴误差越小,耦合器的消光比就越大,制作出来的耦合器的性能越好,因此,自动、精确、快速地确定保偏光纤的方位角,确定光纤偏振轴的位置是制造保偏光纤耦合器的前提。

保偏光纤偏振轴方位角的检测是保偏光纤应用的基础。针对保偏光纤的物理特性和应力结构特征,许多学者提出了各种对轴原理和方法。目前,国内常用的是基于透镜效应的侧面成像法,侧面成像法分为PAS(Profile alignment system)方法和POL(Polarization of observation by lens-effect tracing)方法。其中PAS方法^[7-8]是一种中心图像直接监测法,通过测量观测平面上光强分布曲线中两个最大光强峰值之间的距离变化,建立距离变化量与旋转角度之间的曲线关系,当最大光强峰值变化不敏感时,由于测量过程中的白噪声、光纤制造的缺陷等的存在,导致PAS方法的敏感度不高。POL方法^[8-9]是测量保偏光纤的圆柱透镜效应焦点处光强变化的一种检测法,它所选光强分布的形貌特征是光强分布位于光纤中心位置的最大对照值(光强最大值与最小值的差值)。此方法可以实现不同种类光纤的主轴对准,同时判断保偏光纤的种类,对不同类型的保偏光纤具有通用性,是目前保偏光纤偏振轴方位探测和对准技术的发展方向。由于保偏光纤内部折射率差的大小不同,又有改进的POL方法——相衬成像法^[10]、五点特征法^[11]、五指型法^[12]和三亮纹四点特征法^[13]。这几种改进的POL方法均用在匹配型光纤的对轴中,并不适用于非匹配型光纤的对轴。

为了实现非匹配型细径保偏光纤的对轴,本文建立了熊猫型保偏光纤的折射率模型,对侧向成像法进行有限元仿真,提出了一种基于POL方法焦点附近的最大光强变化的检测方法,设计了保偏光纤对轴实验平台,并进行了相关的实验验证。

2 保偏光纤 POL 方法及建模仿真

2.1 POL 方法

常规的POL方法原理如图1所示,当非相干平行光从保偏光纤的侧面入射时,由于保偏光纤内部的纤芯、应力区和包层的折射率不同,平行光进入光纤后将在内部各结构之间的分界面上发生折射和反射。当保偏光纤自转时,这些结构直接影响到观测面上图像的光强变化。常规的POL方法采用光强差(光强的最大值与最小值的差值)的变化曲线来计算保偏光纤的方位角。当观测距离不同时,光纤光强的变化规律不同。图2是保偏光纤图像的三维(3D)立体图像。

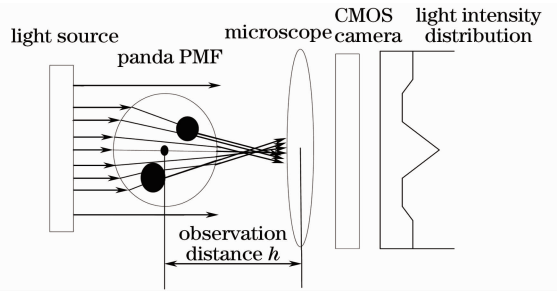


图1 保偏光纤POL方法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the POL method

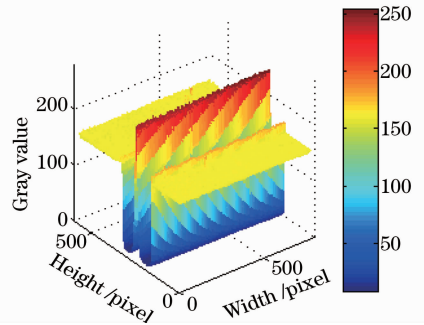


图2 光纤图像的三维立体图

Fig. 2 3D image of the intensity of the fiber

2.2 建模与仿真

不同类型的保偏光纤折射率分布及参数不同,直接影响到偏振轴的检测方法。本文以长飞公司直径为 $80\ \mu\text{m}$ 的非匹配型熊猫保偏光纤为研究对象,熊猫光纤的双折射结构是人为引入不均匀应力造成的。光纤的端面模型如图3所示,由(1)式计算出光纤的折射率分布,如图4所示。

$$n = \begin{cases} n_a, (x^2 + y^2) \leq a^2 \\ n_b, (x-t)^2 + y^2 \leq b^2 \text{ or } (x+t)^2 + y^2 \leq b^2 \\ n_c, (x-t)^2 + y^2 > b^2 \text{ and } r_c \geq (x^2 + y^2) > a^2. \\ \text{ or } (x+t)^2 + y^2 > b^2 \text{ and } r_c \geq (x^2 + y^2) > a^2 \end{cases} \quad (1)$$

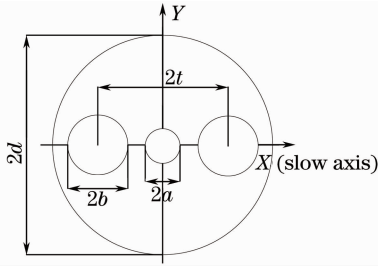


图 3 熊猫保偏光纤端面图

Fig. 3 End view of panda PMF

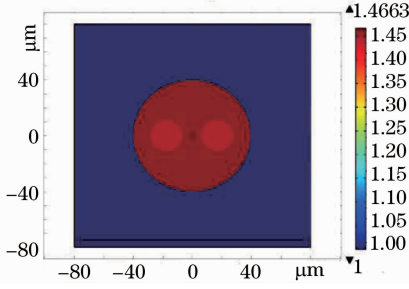


图 4 熊猫保偏光纤折射率分布图

Fig. 4 Panda PMF refractive index profile

以光纤横截面建立二维(2D)仿真模型,平行光从上端入射,入射光的波长为 640 nm,采用 TM 波入射,强度为 1 V/m,采用正四边形划分网格,网格的最大尺寸为 85 nm,两边采用周期边界,底层采用完全匹配层(PML)边界,PML 层宽度为 5 μm ^[14],光在传播过程中满足麦克斯韦方程,其复数形式为

$$\nabla \times H = \sigma E + j\omega \epsilon E, \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -j\omega \mu H, \quad (3)$$

将(2)式变形得

$$\nabla \times H = j\omega \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) E. \quad (4)$$

对(3)式取旋度,并将(4)式代入得

$$\nabla \times (\nabla \times E) - \omega^2 \mu \left(\epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) E = 0, \quad (5)$$

由于 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}$,得

$$\nabla \times (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0. \quad (6)$$

以上各式中 H 是磁场强度, E 是电场强度, k_0 为真空波数, ω 为角频率, μ_0 为真空磁导率, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数。由于在光频段所有的磁化机制不起作用,相对介电常数 $\epsilon_r = n^2$, n 是材料的相对折射率。图 5 是方位角为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 时的仿真结果,其中方位角是保偏光纤慢轴与 X 轴正向之间的夹角。由图 5 可以看出平行光照射到光纤的侧面,在光纤的背面聚焦。随着光纤方位角的变化,光纤的光强变化呈周期性。由图 3 可知熊猫保偏光纤的折射率分布是沿着 X 、 Y 轴对称的,所以光强强度变化的周期是 90° 。当观测面位于透射光线聚焦点附近时,透射光线聚焦成单亮条纹,此时应力区的位置对最大光强的变化的影响最大,最大光强变化曲线如图 6 所示,观测距离为 56 μm 。当方位角为 0° 或者 180° 时,最大光强取到最大值,可以通过最大光强变化曲线判断光纤偏振轴(慢轴)的位置,因此选择基于 POL 方法的焦点附近的最大光强变化来检测保偏光纤偏振轴(慢轴)。

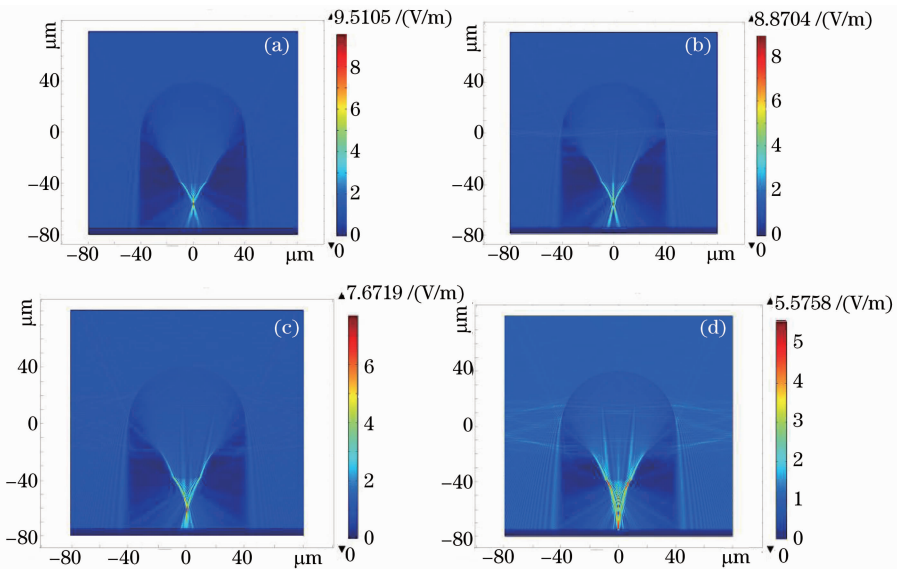

 图 5 保偏光纤侧面成像仿真结果。(a) 方位角为 0° ; (b) 方位角为 30° ; (c) 方位角为 60° ; (d) 方位角为 90°

 Fig. 5 Side view simulation results of PMF. (a) Azimuth is 0° ; (b) azimuth is 30° ; (c) azimuth is 60° ;

 (d) azimuth is 90°

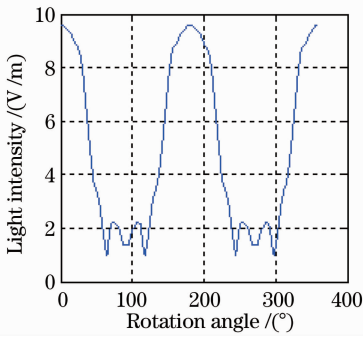


图 6 光纤图像最大光强强度变化图

Fig. 6 Change of the maximum intensity of the optical image

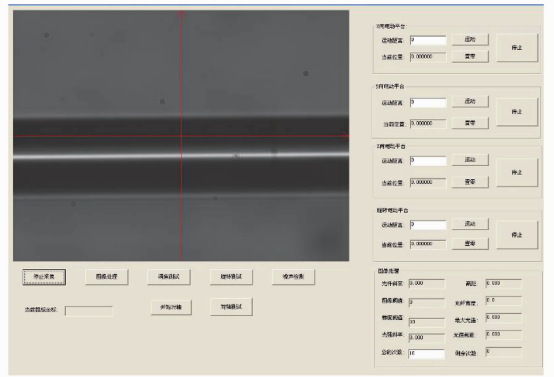


图 8 熊猫型保偏光纤对轴实验控制界面

Fig. 8 Computer control interface of polarization axis detection of PMF

3 细径保偏光纤对轴实验

3.1 实验平台

保偏光纤对轴实验系统如图 7 所示,它主要由旋转电动平台、一维电动位移平台、微型 XY 二维手动精密位移平台、直角显微镜、卤素灯、互补金属氧化物半导体(CMOS)工业数字相机、光纤夹具、运动控制卡和计算机等组成。光纤放在光纤夹具中夹紧,调节微型 XY 二维手动平台,使光纤旋转中心和电动旋转中心同轴;调节一维电动位移平台处于显微镜的焦平面上,此时光纤显微图像的最大光强达到最大。电机在 0°和 360°之间按照 1°的步长进行旋转,旋转每个步长后电机静止,用 CMOS 相机采集光纤图像,然后将图像进行处理,得到光纤的最大光强以及特征值的变化曲线。熊猫型保偏光纤对轴实验的控制界面如图 8 所示。

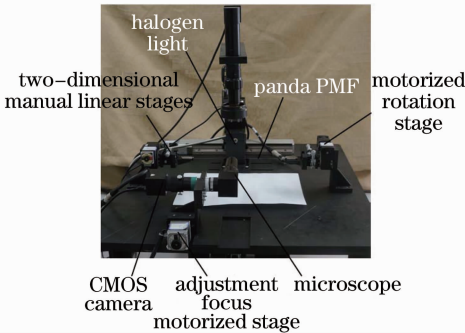


图 7 熊猫型保偏光纤对轴实验结构图

Fig. 7 Experimental setup of polarization axis detection of panda PMF

3.2 图像清晰度函数

根据几何光学可知,直角显微镜的焦平面和透射光线的聚焦点重合时,光纤的显微图像最清晰,光纤图像的最大光强达到最大,此时能够检测保偏光

纤的偏振轴(慢轴)。因此,本文采用图像清晰度函数确定显微镜的位置。

清晰度函数是用来评价图像清晰程度的函数。现在常用的清晰度函数测量方法主要分为两类:空域方法和频域方法。空域方法主要有 Sobel 梯度法、统计方法和 Laplacian 梯度法等^[15],这些方法可以确定图像边缘信息或梯度幅度的图像清晰度;频域方法主要有快速傅里叶变换、余弦变换和离散能量变换,主要通过确定图像的高频成分来判断图像的清晰度。频域方法比空域方法具有更好的抗干扰性能,但计算非常复杂。由于 CMOS 相机和卤素灯存在噪音,采用一种基于阈值的灰度差分函数作为图像清晰度函数:

$$G(i, j) = |y(i, j + 1) - y(i, j)| + |y(i + 1, j) - y(i, j)|, \quad (7)$$

$$F_{\text{thre}} = \begin{cases} 0, & G(i, j) < T \\ \sum_i \sum_j G(i, j), & G(i, j) \geq T \end{cases} \quad (8)$$

式中 $y(i, j)$ 是一个 $M \times N$ 图像的函数, $G(i, j)$ 为灰度差分函数, F_{thre} 为清晰度函数, T 为阈值。

调焦电动位移平台在 7499 μm 和 7664 μm 之间以步长 5 μm 运动,得到了图像清晰度函数与焦距的关系,如图 9 所示。将不同位置处的清晰度函数采用最小二乘二次拟合,可以获知当焦距为 7585 μm 时图像最清晰。

3.3 单亮条纹 POL 实验

当显微镜和光纤的距离改变时,光纤的图像也会产生变化,光纤图像可能出现单亮条纹、双亮条纹、三亮条纹等情况。将调焦电动位移平台在距离光纤 7499 μm 和 7464 μm 之间调整,调焦步长为 5 μm ,光纤旋转每次旋转 1°,旋转 360 次,光纤图像

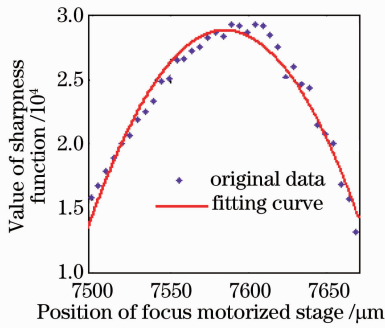


图9 清晰度函数与焦距关系图

Fig. 9 Relation between sharpness function and focus value

纵切面的灰度变化如图 10 所示。图 10 表明光纤图像的最大光强变化不仅与保偏光纤的方位角有关系,而且与光纤和显微镜的距离有关。当调焦电动平台位置在 7585 μm 时,光纤图像的最大光强变化如图 11 所示,通过傅里叶滤波和三次样条拟合^[16]得到此时保偏光纤方位角为 130.69°。对同一根光纤重复做 10 次实验,结果如表 1 所示,检测结果的平均值为 130.5810°,方差为 0.0347°,偏振轴检测的重复精度为 0.61°,该方法检测保偏光纤的偏振轴(慢轴)比较稳定。

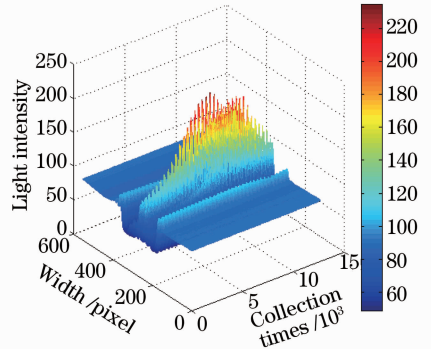


图 10 光纤图像纵切面的灰度变化图

Fig. 10 Gray values change for the longitudinal section of the fiber image

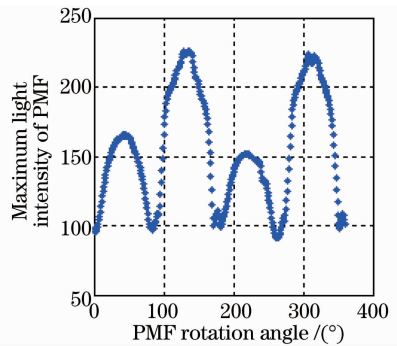


图 11 图像最清晰时的最大光强变化图

Fig. 11 Change of the maximum intensity when the image is the clearest one

表 1 对轴重复测量结果

Table 1 Repeated detection polarization axis results

Times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Azimuth / (°)	130.69	130.58	130.74	130.58	130.75	130.4	130.55	130.59	130.77	130.16

4 结 论

利用有限元方法对细径保偏光纤的侧向成像进行了仿真,结果表明平行光经过细径保偏光纤在侧面聚焦,保偏光纤应力区的位置直接影响侧面成像的效果。当观测面处于透射光线聚焦点附近时,光纤的显微图像呈现单亮条纹的特征,此时图像最大灰度值呈周期性变化,并且当方位角为 0°或者 180°时,即慢轴时,图像的最大灰度值达到最大。因此,可选择焦点附近的最大光强变化检测保偏光纤的偏振轴。直角显微镜的焦平面和透射光线的聚焦点重合时,光纤的显微图像最清晰。采用基于阈值的图像清晰度函数,确定了显微镜检测的位置,然后将采集的数据进行傅里叶滤波和三次样条拟合,确定保偏光纤偏振轴的位置,最后测得偏振轴检测重复精度为 0.61°。该方法的重复误差小,检测稳定,能够

应用在采用细径熊猫型非匹配保偏光纤的耦合器制造过程中。

参 考 文 献

- 1 D Penninckx, N Beck, J Gleyz, *et al.*. Signal propagation over polarization-maintaining fibers: problem and solutions [J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(11): 4197–4207.
- 2 T Segi, Y Ouchi, K Nishiwaki, *et al.*. Polarization-maintaining EDFA for optical sensing application, composed of PANDA fiber based low loss and low cross-talk optical components[C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, 1: 289–292.
- 3 Lin Jinhai, Zhang Weigang. Recent process in theory, design and development of fiber coupler[J]. *Progress in Physics*, 2010, 30(1): 37–80.
林锦海, 张伟刚. 光纤耦合器的理论、设计及进展[J]. *物理学进展*, 2010, 30(1): 37–80.
- 4 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan, *et al.*. Fused planar 3×3 single mode fiber coupler[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(4): 323–327.
何娜, 吴重庆, 卫炎, 等. 熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(4): 323–327.

- 5 Yang Huayong, Jiang Nuan, Zhang Xueliang, *et al.*. Study on fabrication and optical add-drop multiplexing experiments with panda fiber grating coupler[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1430–1433.
杨华勇, 姜 暖, 张学亮, 等. 熊猫型保偏光纤光栅耦合器制备工艺及光分插复用实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1430–1433.
- 6 Zou Weiwen, He Zuyuan, Kazuo Hotate. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. Opt Express, 2009, 17(3): 1248–1255.
- 7 Zheng W. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fiber[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(1): 125–134.
- 8 W X Zheng, D Duke, K Toshiki, *et al.*. Interrelation profile analysis method for alignment of polarization-maintaining fiber [C]. Proceedings of Optical Fiber Communication, Collocated National Fiber Optic Engineers, San Diego, CA, 2010.
- 9 W X Zheng, H Sugawara, B Malinsky. Fourier analysis method for asymmetric polarization-maintaining fiber alignment [C]. OFC/NFOEC2012, Los Angeles, CA, 2012.
- 10 Hu Yongming, Chen Zhe, Liao Yanbiao, *et al.*. Computer simulation of phase contrast alignment of birefringent axes in panda fiber of matching refractive-index[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(8): 715–721.
胡永明, 陈 哲, 廖延彪, 等. 匹配型熊猫光纤的相衬法定轴技术的仿真分析[J]. 中国激光, 1998, 25(8): 715–721.
- 11 Wu Yulie, Zheng Yu, Wang Jin'e, *et al.*. Research of azimuthal alignment for PANDA fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(7): 1224–1229.
吴宇列, 郑 煜, 王金娥, 等. 熊猫型保偏光纤定轴仿真研究[J]. 光子学报, 2007, 36(7): 1224–1229.
- 12 Chen Shaoying, Di Hongwei, Chen Zhe, *et al.*. Azimuthal alignment method for PM fiber based on light intensity distributions with five finger profile[J]. Applied Laser, 2006, 26(1): 35–38.
陈少英, 狄红卫, 陈 哲, 等. 基于五指型光强分布的保偏光纤定轴方法[J]. 应用激光, 2006, 26(1): 35–38.
- 13 Rong Weibin, Gao Jian, Chen Tao, *et al.*. Method optimization and determining polarization direction experiment of ultra-fine polarization maintaining fiber[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(8): 36–41.
荣伟彬, 高 健, 陈 涛, 等. 超细径保偏光纤的对轴方法优化及实验[J]. 光电工程, 2010, 37(8): 36–41.
- 14 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1002003.
张建伟, 宁永强, 张 星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1002003.
- 15 N Kehtarnavaza, H J Oh. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm[J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(3): 197–203.
- 16 W B Rong, W Zhang, L F Wang, *et al.*. Investigation of the data processing method for high-precision alignment of PM fibers[J]. Key Engineering Materials, 2013, 562-565: 1482–1488.

栏目编辑: 王晓球