

保偏光纤偏振模间延迟的放电调整及波片制作

陈宇轩¹ 杨远洪^{1,2} 杨明伟¹

¹北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室,北京 100191

²北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室,北京 100191

摘要 建立了局部放电引起保偏光纤(PMF)两偏振模间相位延迟变化的模型。将熊猫型保偏光纤(P-PMF)和保偏光子晶体光纤(PM-PCF)分别接入萨格纳克干涉仪进行实验研究,发现局部放电使应力型P-PMF的相位延迟变小,使形状型PM-PCF的相位延迟变大,且改变放电电流大小和持续时间可有效改变相位延迟调节量,为调节PMF中两偏振模间相位延迟提供了实用技术。搭建了在线光纤波片制作装置,进行了PM-PCF光纤1/4波片制作的实验研究,实现了0.15°的相位延迟精度。多次实验结果表明,采用该技术可保证约0.24°的相位延迟精度。该技术具有操作简单、成本低等优点,可有效提高光纤波片的相位延迟量精度和制作效率。

关键词 光纤光学; 光纤波片; 电弧放电; 光纤相位延迟器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0405006

Redressing Effect of Arc Discharging on Polarization Mode Phase Retardation of Polarization Maintaining Fiber and Application in Waveplate Fabrication

Chen Yuxuan¹ Yang Yuanhong^{1,2} Yang Mingwei¹

¹Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China

²National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract The model of phase retardation shift between the two polarization modes of polarization maintaining fiber (PMF) caused by partially discharging is established. The Panda polarization maintaining fiber (P-PMF) and polarization maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) are investigated respectively in a Sagnac interferometer. The results show that the phase retardations of stress-induced P-PMF and shape-induced PM-PCF will decrease and increase respectively after being partially discharged, and the shift of phase retardation can be effectively changed by adjusting discharging current and duration time, which provides a practical technique for redressing the phase retardation of polarization modes in PMF. An on-line waveplate fabrication setup is established and the fabrication of PM-PCF quarter waveplates is experimentally investigated. A phase retardation precision of 0.15° is achieved. The repeated experimental results demonstrate that the precision of phase retardation can reach about 0.24°. The proposed technique is simple and cost-effective, which can improve the phase retardation precision and the fabrication efficiency of fiber optic waveplates.

Key words fiber optics; fiber optic waveplates; arc discharge; fiber optic phase retarder

OCIS codes 060.2340; 060.2420; 060.5295

1 引 言

波片(即相位延迟器)是一种重要的光学偏振调制器件,通常由云母、液晶等高双折射材料制成^[1],能使透

收稿日期: 2014-10-27; 收到修改稿日期: 2014-11-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 陈宇轩(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: sy1317122@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人。中国光学学会会员号: S040420656S)

过的光在两个相互垂直的偏振光分量间产生相位延迟,可用于光偏振态的转换或测量^[2]。较常见的有1/4波片和1/2波片,广泛应用于电流互感器^[3-4]、原子磁力仪^[5]、单频偏振激光干涉仪^[6]、偏振测量系统^[7]等设备中。其中,基于高双折射保偏光纤(PMF)的光纤波片具有结构简单、易于与光纤系统耦合等优点^[8],有广阔的应用前景。目前常用的光纤波片制作方法是直截熔接法,即直接截取一定长度的PMF作为波片,在其前端熔接输入光纤,后端熔接低双折射光纤(LBF)以保持输出光偏振态,其相位延迟量由PMF的长度及双折射大小决定^[9-11]。该方法要求截取长度为PMF拍长特定倍数的光纤,对光纤拍长的测量精度有较高要求,而拍长测量一般比较复杂^[12]。此外PMF的拍长一般为毫米量级,很难精确截取特定长度的光纤^[10],而且熔接过程中在熔接点会产生相位延迟突变,特别是保偏光子晶体光纤(PM-PCF)由于气孔塌缩导致的突变比较明显。直截熔接法制作的波片相位延迟误差很难控制,相位延迟精度只能达到 $\pm 1^\circ$ ^[3],良品率低。为解决这个问题,李建中等^[10-11]做了一些光纤截取工艺上的改进,希望通过提高切割精度保证相位延迟精度。

针对光纤波片相位延迟控制困难的问题,本文对比研究了放电对熊猫型保偏光纤(P-PMF)及PM-PCF的偏振模间相位延迟的调节作用。在此基础上利用放电工艺对预制的PM-PCF光纤1/4波片相位延迟进行调节,有效解决了光纤波片相位延迟控制困难,特别是熔接点相位突变的问题。

2 放电对PMF偏振模间相位延迟的调节机理及测试技术

光纤波片基于PMF两偏振模传输系数差实现相位延迟。能用于制作光纤波片的光纤主要有应力型PMF和形状型PMF。熊猫型和领结型PMF属于应力双折射型,而椭圆芯PMF和PM-PCF则属于形状双折射型。P-PMF及PM-PCF的端面结构如图1所示。对于前者,放电产生的瞬时高温会使得应力区的掺杂元素扩散进包层中^[13],导致应力释放,使放电区的双折射变小。对于后者,双折射是由其非圆对称结构产生的,温度稳定性高,对直接放电不敏感。但是在放电的同时对其轴向施加一定的拉力,则放电区域的光纤直径会因拉伸而变细,其小孔间距 Λ 也减小,放电区的双折射会增大^[14-16]。局部放电后,PMF偏振模间相位延迟 δ 可描述为

$$\delta = \frac{2\pi[\Delta n \cdot (L-l) + \Delta n' \cdot l']}{\lambda} = \frac{2\pi(\Delta n \cdot L + \varepsilon \cdot l + \Delta n \cdot \Delta l + \varepsilon \cdot \Delta l)}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 L 为放电前PMF总长度, l 和 l' 分别为放电前后放电区的长度, $\Delta l = l' - l$, Δn 和 $\Delta n'$ 分别为未放电区及放电区的双折射, $\varepsilon = \Delta n' - \Delta n$, λ 为入射光波长。

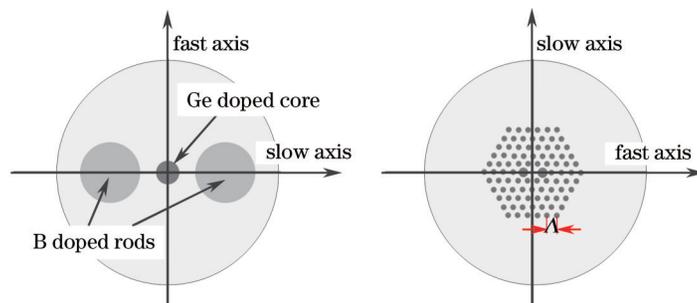


图1 P-PMF和PM-PCF的端面

Fig.1 End views of P-PMF and PM-PCF

一般情况下, l 约为1 mm,且放电前后变化很小,可忽略其变化对相位延迟的影响,则放电引起的相位延迟变化由局部双折射变化引起。忽略高次小量后,(1)式可近似为

$$\delta = 2\pi(\Delta nL/\lambda + \varepsilon l/\lambda) = 2\pi\Delta nL/\lambda + \Delta\varphi, \quad (2)$$

式中 $\Delta\varphi = 2\pi\varepsilon l/\lambda$ 为放电引入的相位延迟变化。由(2)式可知,PMF放电区双折射的变化量 ε 与其相位延迟的变化量 $\Delta\varphi$ 成正比,比例系数为 $2\pi l/\lambda$ 。

光纤萨格纳克(Sagnac)干涉仪具备很好的互易性,能消除其他因素的影响。本文将实验PMF接入Sagnac环形成混合Sagnac干涉仪,并采用熔接机作为放电装置,研究放电对PMF相位延迟的调节作用。

Sagnac干涉仪放电及光谱测试装置如图2所示,混合Sagnac干涉环由2×2单模耦合器和实验PMF构成;光纤光栅解调仪(OSI, MICRON OPTICS SM-125)加光纤隔离器(ISO)用于干涉仪输出光谱测量,ISO用于消除端口

2 输出光的干扰,带弹簧的位移调节平台用于夹持 PMF 并施加适当的拉力,使用保偏熔接机(ERICSSON FSU-995 PM)实现对 PMF 的放电处理。Sagnac 干涉仪输出典型干涉光谱如图 3 所示,干涉光光强可表示为^[15]

$$I = K[1 - \cos(\delta)], \quad (3)$$

式中 I 为输出光强, K 是光路损耗相关系数。相位延迟 δ 改变会导致干涉光谱的平移,当相位延迟改变 2π 时,光谱平移一个周期。设光谱平移量为 $\Delta\lambda$,干涉光谱两个极小值间的距离(即光谱周期)为 S ,则 $\Delta\varphi$ 与 $\Delta\lambda$ 有如下关系:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \Delta\lambda / S. \quad (4)$$

由(4)式可见,在对 PMF 局部放电时,通过测量 $\Delta\lambda$ 的变化,可以计算放电产生的相位延迟变化量。

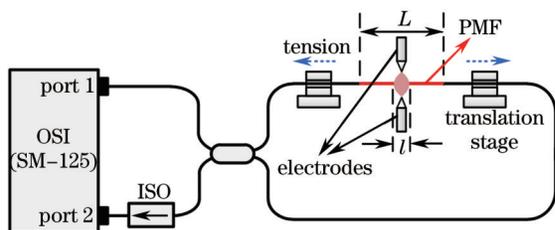


图2 Sagnac干涉仪放电及光谱测试装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of Sagnac interferometer discharging and spectrum detecting setup

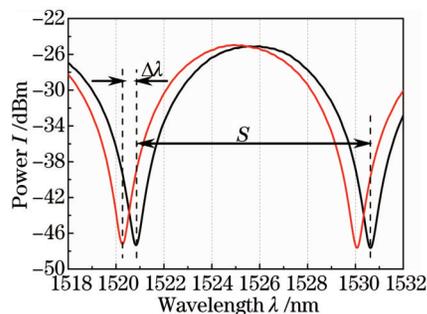


图3 典型输出干涉光谱

Fig.3 Typical output interference spectrum

3 放电对 PMF 偏振模间相位延迟调节作用的实验研究

3.1 对 P-PMF 的放电实验

P-PMF 为典型的应力型 PMF,以 P-PMF 为例研究了不同放电时间、放电电流及放电次数对相位延迟的调节作用,其中光谱移动量由实验测得,相位延迟变化量由光谱移动量按(4)式计算得到。

实验中按两组放电参数对 P-PMF 进行了单点多次放电实验,放电持续时间和放电电流值为主要的作用参数,表示为(放电时间,放电电流)。图 4 为参数(0.8 s, 8 mA)及(1 s, 10 mA)作用下的光谱移动和对应的 $\Delta\varphi$ 。

由图 4 可知,放电后 P-PMF 的应力双折射变小,随着放电次数增加,总相位延迟减小,在(0.8 s, 8 mA)、(1 s, 10 mA)下分别放电 6 次,其总的相位延迟变化分别为 -18.13° 和 -48.25° 。

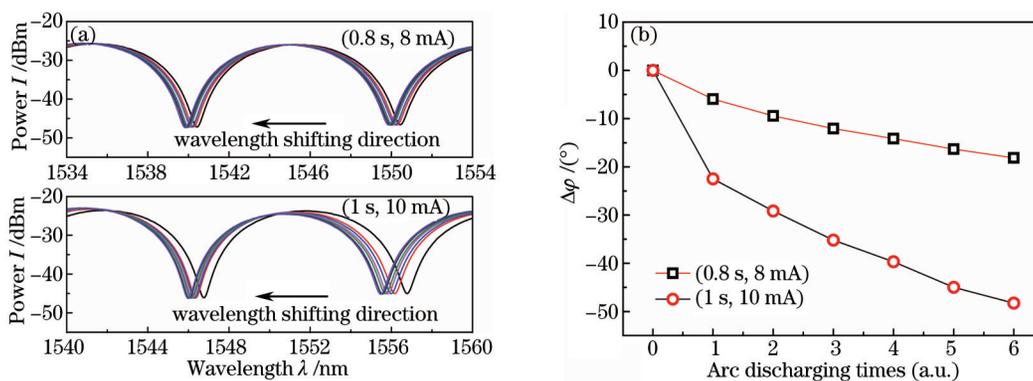


图4 P-PMF 在不同参数及次数下的实验结果。(a) 光谱移动;(b) 相位延迟变化量

Fig.4 Experimental results of P-PMF under different discharging parameters and times. (a) Spectrum shifting; (b) phase retardation variation

3.2 对 PM-PCF 的放电实验

PM-PCF 为典型的形状型双折射光纤,采用与 3.1 节相同的方法,进行了 PM-PCF 放电相位延迟调节实验,为了增强放电引起的形变,在光纤两端施加了应力,约为 0.01 N。图 5 为参数(0.8 s, 8 mA)及(1 s, 10 mA)作用下的光谱移动和对应的 $\Delta\varphi$ 。

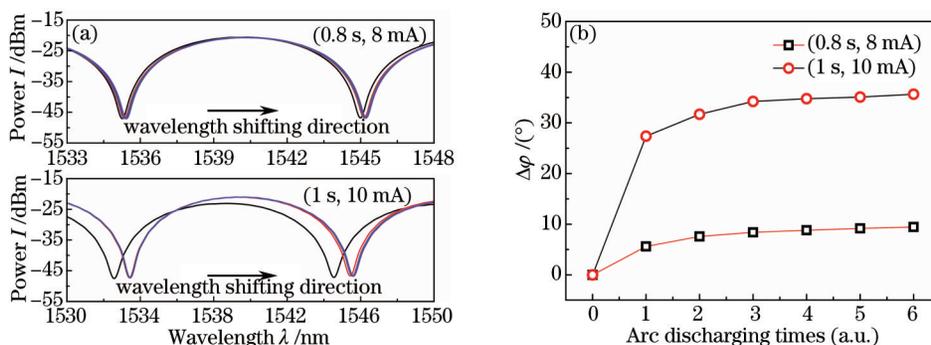


图5 PM-PCF在不同参数及次数下的实验结果。(a) 光谱移动; (b) 相位延迟变化量

Fig.5 Experimental results of PM-PCF under different discharging parameters and times. (a) Spectrum shifting; (b) phase retardation variation

由图5可知,与P-PMF相反,放电后PM-PCF的形状双折射变大,随着放电次数增加,总相位延迟增加,在(0.8 s, 8 mA)、(1 s, 10 mA)下6次放电,相位延迟变化分别为 9.46° 和 35.66° 。

3.3 讨论

两种光纤都是第一次放电时对相位延迟的调节量最大,分别可达 -22.48° 和 27.38° 。随着放电次数的增加,每次放电产生的调节量逐渐减小,且PM-PCF减小的速度更快。采用多次放电技术,可以实现较大相位延迟的调节。单次放电调节幅度由放电持续时间和放电电流大小决定,既可采用大电流长时间实现大范围调整,也可用小电流短时间实现微调。将此项技术应用于波片制作,当波片初始误差较小时,可以通过设置较小的放电参数来实现精细调节;当波片误差较大,需要大范围粗调时,则可以通过设置较大的放电参数来实现。实际制作时可以通过在多个区域以不同参数放电的方式来实现对波片相位延迟量由粗到细的调节。

4 PM-PCF 1/4 波片在线制作

由于PM-PCF波片具有温度稳定性高、带宽宽等优点,比一般P-PMF波片更具有实用价值^[8]。为获得精确相位延迟的PM-PCF 1/4波片,基于放电相位延迟调节技术,搭建了光纤波片在线制作及相位延迟测量系统,进行了实验研究。

图6为放电技术制作光纤波片并在线测试相位延迟的实验装置示意图,该装置由1310 nm超辐射二极管(SLD)光源、光纤位移调节平台、光纤熔接机(实现可控的放电)和偏振分析仪(THORLABS PAX-5710)组成。光源发出的光经起偏器后变为线偏振光,线偏振光经过波片样品后变为椭圆偏振光,经低双折射光纤(LBF)传输后保持偏振态不变,输入偏振分析仪。在放电调节的过程中,通过偏振分析仪实时监测波片的实际相位延迟。用起偏器尾纤、LBF(LB1300-125P)及PM-PCF(长飞PM15001)按照直截熔接法制作1/4波片样品:对轴时用熔接机自动 45° 对轴,手动微调对轴角度至偏振分析仪测得的偏振度最小时熔接^[10-11]。移动光纤,使PM-PCF位于放电电极间,通过放电进行相位延迟调整。

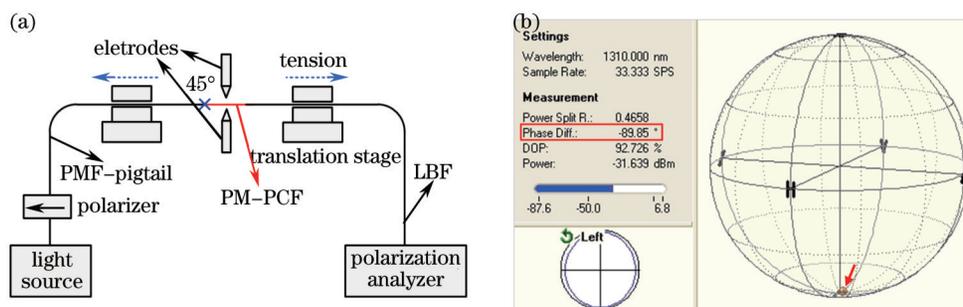


图6 (a) 光纤波片制作及测试装置; (b) 典型测试界面

Fig.6 (a) Fabricating and testing setup of fiber optic waveplates; (b) typical testing interface

在放电过程中,偏振态在邦加球上的典型变化过程如图7(a)所示,波片的初始相位延迟量为 -134.57° ,与 -90° 相差较大,故在较大的放电时间和放电电流(1 s, 10 mA)下放电3次进行粗调,相位延迟量变为

-100.19°。调小放电参数进行微调,在(0.8 s, 8 mA)下放电3次,相位延迟量变为-89.85°,达到调节极限,此时相位延迟量误差为0.15°,实现了精确的1/4波片相位延迟。

重复实验10次,所得相位延迟误差绝对值结果如图7(b)所示,10次重复实验的误差均在0.4°以内,平均误差为0.24°,最小误差可达0.15°。实验表明采用局部放电技术可以方便地实现波片相位延迟的调整,能获得高精度相位延迟的波片。

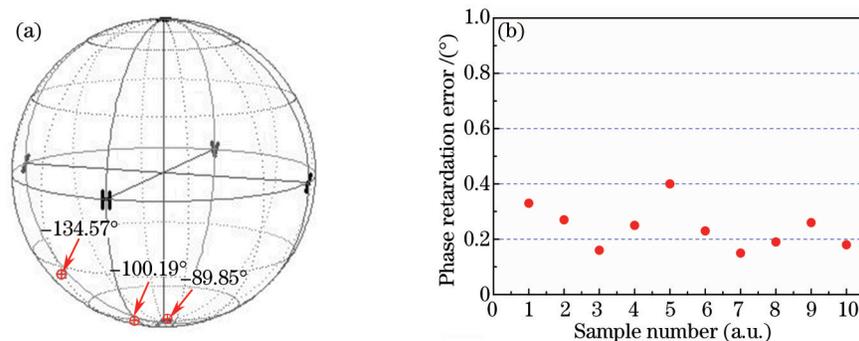


图7 (a) 典型放电过程中的相位延迟变化; (b) 10次重复实验的相位延迟误差

Fig.7 (a) Phase retardation variations during a typical redressing process; (b) phase retardation errors of ten repeated experiments

5 结 论

对高双折射PMF偏振模间相位延迟的放电调制现象进行了研究,理论分析并实验研究了放电对P-PMF及PM-PCF相位延迟的调节作用。在此基础上利用放电技术对预制PM-PCF 1/4波片样品进行相位延迟调节,获得了0.15°的相位延迟精度。多次实验结果表明,采用该技术,可保证相位延迟误差小于0.4°。测试结果表明该方法具有较高的可行性和实用价值,并且通过优化放电参数还可以进一步提高精度。

参 考 文 献

- 1 Zhang Pengcheng, Ren Guobin. Optimization and design of composite terahertz achromatic wave plate[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0111001.
张鹏程, 任国斌. 消色差复合宽带太赫兹波片的优化设计[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0111001.
- 2 Gu Yaohui, Zhang Yan, Jiao Xiang, *et al.*. Measurement for retardation of wave plates using the relative angle method[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0908002.
谷耀辉, 张 燕, 焦 翔, 等. 相对角度法测量波片相位延迟量[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908002.
- 3 S X Short, A A Tselikov, J U de Arruda, *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(7): 1212.
- 4 J Blake, P Tantaswadi, R T de Carvalho. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.
- 5 Li Shuguang, Zhou Xiang, Cao Xiaochao, *et al.*. All-optical high sensitive atomic magnetometer[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(2): 877-882.
李曙光, 周 翔, 曹晓超, 等. 全光学高灵敏度铷原子磁力仪的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(2): 877-882.
- 6 Li Liyan, Yuan Yonggui, Wu Bing, *et al.*. Effect of wave plate on nonlinear error in single-frequency polarized laser interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112009.
李立艳, 苑勇贵, 吴 冰, 等. 单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112009.
- 7 Dong Juan, Li Yanqiu. Effect of assembly and manufacturing error for wide-viewing-angle quarter waveplate on polarimetry[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612006.
董 娟, 李艳秋. 宽视场角1/4波片装调和加工误差对偏振检测的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612006.
- 8 Dong Xiaopeng, Hao Jiajian, Su Juan, *et al.*. Temperature stabilized and broadband fiber waveplate fabricated with a birefringent photonic crystal fiber[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2010, 3(1): 9-12.
- 9 Shi Zhidong, Ji Minning, Lin Jianqiang, *et al.*. Quarter wave plate made by cutting straight holey birefringent fiber[C]. SPIE, 2008, 7134: 713449.

- 10 Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, *et al.*. Fabrication of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current transducer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2167-2172.
 李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片制作工艺[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2167-2172.
- 11 Zhang Rui, Lu Huaqing, Liu Ying, *et al.*. Polarization-maintaining photonic crystal fiber based quarter waveplate for temperature stability improvement of fiber optic current sensor[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(12): 963-969.
- 12 Xiao Yueyu, Wang Zhaozhao, Shi Zhidong, *et al.*. Beat-length measurement of polarization maintaining fibers based on broadband fiber circular polarizers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1206002.
 肖悦娱, 王昭昭, 石志东, 等. 基于宽带光纤圆起偏器的保偏光纤拍长测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1206002.
- 13 M N Mclandrich. Core dopant profiles in weakly fused single-mode fibers[J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(1): 8-10.
- 14 Ye Miao, Yang Yuanhong, Duan Weiqian, *et al.*. Measure and redress of mode field diameter of polarization maintaining photonic crystal fibers[C]. *Instrumentation and Control Technology (ISICT), International Symposium on 2012 8th IEEE*, 2012: 101-104.
- 15 Duan Weiqian, Yang Yuanhong, Zhang Xing, *et al.*. Experimental investigation of birefringence of solid core polarization maintaining photonic crystal fibers[C]. *SPIE*, 2012, 8561: 85610J.
- 16 E C Mägi, P Steinvurzel, B J EggletonJ. Tapered photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(5): 776-784.

栏目编辑: 史 敏