

光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响

吴长莘¹ 杨明伟¹ 杨远洪^{1,2} 索鑫鑫² 王 婷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 为研究光纤弯曲对干涉式光纤陀螺性能的影响,选取常用的单模光纤、保偏光纤、光子晶体光纤及保偏光子晶体光纤为研究对象,建立了光纤弯曲与光纤陀螺性能的相关理论模型。以高精度光纤陀螺应用为背景,选取掺铒超荧光光纤光源,改变光纤弯曲半径,测出了经过光纤样品后的光功率、平均波长、光谱宽度的变化和平均波长波动,在此基础上分析了弯曲半径对光纤陀螺标度因数和随机游走系数的影响。理论分析和实验结果表明,采用光子晶体光纤时,光纤弯曲对光纤陀螺性能几乎没有影响,采用其他光纤时,需要严格控制光路中的光纤弯曲半径。

关键词 光纤光学;光纤陀螺;光纤弯曲;光谱特性

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0306005

Effect of Fiber Bend on Interferometric Fiber Optical Gyroscopes Performance

Wu Changxin¹ Yang Mingwei¹ Yang Yuanhong^{1,2} Suo Xinxin² Wang Ting¹

(¹ Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing, 100191, China)
(² National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The bending effects of single mode fiber, polarization maintaining fiber, photonic crystal fiber and polarization maintaining photonic crystal fiber on fiber optical gyroscopes (FOG) performance are analyzed. A comprehensive model is established, and then based on high-precision FOG application, the power, spectrum width, and mean wavelength after transmitting sample fibers are measured by using the erbium-doped superfluorescent fiber source when changing the bend radius. Based on the measured data, the scale factor stability and random walk coefficient of FOG are calculated. The results show that bending effect of photonic crystal fiber is very small and can be neglected in FOG, while the bend radius should be controlled when using other two conventional fibers.

Key words fiber optics; fiber optical gyroscope; fiber bend; spectral characteristics

OCIS codes 060.2370; 060.2800; 070.4790

1 引 言

光纤陀螺(FOG)为光电集成的光电仪表,其中光纤、光波器件和电路都集成在有限的空间内,存在多段小曲率半径弯曲光纤,这些弯曲点引起的损耗和光谱变化是影响光纤陀螺性能和稳定性的重要因素。特别对于高精度 FOG,这种影响会更明显,主

要体现在光路装配过程中,作为传输介质的光纤,尤其光源、耦合器及 Y 波导的尾纤,存在多段小半径的弯曲,不但会带来较大的损耗,还会改变平均波长及光谱宽度,影响 FOG 的性能和稳定性。目前,有关光纤弯曲现象的研究热点主要集中在弯曲损耗的机理^[1-7]、影响因素^[8]、抗弯曲光纤设计^[9],或是利

收稿日期: 2013-09-09; **收到修改稿日期**: 2013-10-30

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(IRT 1203)

作者简介: 吴长莘(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: wuchangxin_1208@163.com

导师简介: 杨明伟(1979—),男,讲师,硕士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: yangmingwei@buaa.edu.cn(通信联系人)

用光纤弯曲引起的光强变化来制作传感器以测量振动等物理量^[10]。对于高精度光纤陀螺中,光纤弯曲对宽谱光源光谱参数的影响,及其对光纤陀螺性能造成的影响研究甚少。

本文以高精度光纤陀螺为应用背景,选取掺铒超荧光光纤光源,以常用的单模光纤(SMF)、保偏光纤(PMF)、光子晶体光纤(PCF)及保偏光子晶体光纤(PMPCF)为传输光纤,通过改变光纤弯曲半径,测量了光源的光功率、平均波长、光谱宽度的变化及平均波长波动,在此基础上分析了弯曲半径对光纤陀螺标度因数稳定性和随机游走系数的影响。研究表明,采用光子晶体光纤时,光纤弯曲对光纤陀螺性能几乎没有影响,采用其他光纤时,需要严格控制光路中光纤弯曲半径。

2 理 论

标度因数稳定性和随机游走系数是 FOG 性能的主要指标,随机游走系数用来表征 FOG 中白噪声的大小。在闭环 FOG 中,标度因数(SF, K)和随机游走系数(RWC, f_{RWC})表示为^[11]

$$K = \frac{2\pi LD}{K_m K_{\text{DA}} \bar{\lambda} c}, \quad (1)$$

$$f_{\text{RWC}} = \frac{1}{\sqrt{R_{\text{SN}}}} \frac{\bar{\lambda} c}{2\pi LD}, \quad (2)$$

式中 L 为光纤环长度, D 为光纤环直径, $\bar{\lambda}$ 为平均波长, c 为真空中光速, K_m 为调制器调制系数, K_{DA} 为数模(D/A)转换器及其放大器增益, R_{SN} 为信噪比, 可表示为

$$R_{\text{SN}} = \frac{R_{\Omega}^2 R_{\text{D}}^2 P_0^2 \sin^2(\varphi_b)}{2eR_{\Omega}^2 \{i_{\text{dark}} + R_{\text{D}} P_0 [1 + \cos(\varphi_b)]\} + 4k_{\text{B}} TR_{\Omega} + \frac{R_{\Omega}^2 R_{\text{D}}^2 P_0^2 [1 + \cos(\varphi_b)]^2 \bar{\lambda}^2}{c \cdot \Delta\lambda}}, \quad (3)$$

其中 k_{B} 为玻耳兹曼常数, e 为电子常量, T 为温度, R_{D} 为探测器响应度, i_{dark} 为探测器暗电流, R_{Ω} 为探测器跨阻, P_0 为到达探测器功率, φ_b 为相位偏置工作点, $\Delta\lambda$ 为光谱宽度。

由(1)式可以看出, FOG 标度因数误差来源于光源平均波长、光纤环长度和直径、调制系数、D/A转换器及其放大器增益的变化。光纤弯曲会改变光源平均波长, 假设其余影响因素均保持稳定, 则光纤弯曲对 FOG 标度因数稳定性的影响, 可表示为

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}}, \quad (4)$$

式中 $\Delta K/K$ 为标度因数稳定性, $\Delta \bar{\lambda}/\bar{\lambda}$ 为平均波长稳定性。

由(2)、(3)式可以看出, 光纤弯曲改变光源光功率, 使探测器探测功率发生变化, 进而影响 RWC, 此外, 光纤弯曲对光源平均波长和光谱宽度的影响也会间接影响 RWC。

光源平均波长定义为整个光谱上所有波长分量的功率加权平均, 光谱宽度定义为光功率的平方加权, 可分别表示为^[11]

$$\bar{\lambda} = \frac{\int P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\left[\int P(\lambda) d\lambda \right]^2}{\int P^2(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中 $P(\lambda)$ 为光源中光谱波长对应的功率。可以看出, 光源平均波长、光谱宽度与光源各波长分量的功率相关。由于 FOG 采用宽谱光源, 光纤弯曲对不同波长分量引起的损耗不同, 进而会影响 FOG 标度因数稳定性和随机游走系数的值。

SMF、PMF、PCF、PMPCF 等均可用于光纤陀螺。发生弯曲时, 会产生损耗, 尤其当光纤弯曲半径小于临界弯曲半径时, 损耗迅速增大^[1]。光纤弯曲前后的光功率可以表示为

$$P(z) = P(0) \exp(-\alpha 2\pi RN), \quad (7)$$

式中 $P(0)$ 、 $P(z)$ 为光纤弯曲前后的光功率值, α 为弯曲损耗系数, R 为弯曲半径, N 为弯曲圈数。光纤结构上的差异导致弯曲损耗系数不同, 对 SMF 来说, 其弯曲损耗系数可表示为^[1]

$$\alpha = \alpha_0 \frac{2(Z_3 + Z_2)^{1/2}}{(Z_3 + Z_2) - (Z_3 - Z_2) \cos(2\theta_0)}, \quad (8)$$

式中

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{\gamma^3 R} \right)^{1/2} \frac{\kappa^2}{V^2 K_1^2(\gamma a)} \exp\left(-\frac{2\gamma^3 R}{3\beta_0^2}\right), \quad (9)$$

$$Z_q \approx k_0^2 n_q^2 (1 + 2b/R) - \beta_0^2, \quad q = 2, 3, \quad (10)$$

$$\theta_0 = \frac{\gamma^3 R}{3k_0^2 n_2^2} \left(\frac{R_c}{R} - 1 \right)^{3/2}, \quad (11)$$

$$R_c = 2k_0^2 n_2^2 b / \gamma^2, \quad (12)$$

$$\gamma = (\beta_0^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$V = ak_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, \quad (14)$$

$$\kappa^2 = k_0^2 n_1^2 - \beta_0^2, \quad (15)$$

式中 α_0 为假设光纤包层无限大时的弯曲损耗系数, R_c 为临界弯曲半径, β_0 是光纤在未弯曲情况下的传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中自由波数, λ 为波长, n_1 、 n_2 、 n_3 分别为光纤纤芯、包层、覆层的折射率, a 、 b 分别为纤芯、包层的半径, K_1 为 1 阶第二类虚宗量 Bessel 函数。

由(8)~(15)式可以看出, SMF 的弯曲损耗与弯曲半径、波长及弯曲圈数有关, 当弯曲半径减小、波长增加、弯曲圈数增加都会使弯曲损耗增加, 且弯曲损耗会出现振荡现象。这是由于光纤弯曲时, 基模泄露的能量被包层和覆层反射后重新与基模耦合所致, 由(8)、(11)式可以看出, 弯曲损耗及振荡强度与弯曲半径和波长相关。

对于 PCF, 弯曲损耗系数的计算主要两种方法, 即等效折射率法^[3-4]和全矢量有限元法^[5,7]。前者是对 SMF 无限大包层模型[见(9)式]进行改进, 得到弯曲损耗呈单调变化, 后者是通过不同子空间离散麦克斯韦方程组得到复传播常量, 比前者更为精确。研究表明, PCF 弯曲损耗随弯曲半径的变化规律与 SMF 类似, 但 PCF 的弯曲损耗理论上远小于传统的 SMF, 这是由于 PCF 空气孔的存在, 使其等效包层折射率要小于 SMF。

目前, 对于 PMF 和 PMPCF 的弯曲损耗研究相对较少, 通常将其等效成 SMF, 利用无限大包层模型计算。PMF 弯曲损耗特性与 SMF 类似, 但 PMF 临界弯曲半径要小于 SMF^[12]。这是由于 PMF 的模场直径小于 SMF, 且应力元引入的残余应力与弯曲产生的应力叠加相消也是一方面原因^[13]。PMPCF 的弯曲损耗特性与 PCF 光纤相似, 主要是由于两种光纤的包层等效折射率随波长变化规律基

本一致^[14]所致。

3 实验研究

考虑到影响 FOG 标度因数稳定性和随机游走系数的因素较多, 为了分析光纤弯曲引起的光路损耗和光谱变化对 FOG 工作性能的影响, 首先搭建实验系统实测光纤弯曲对光路损耗、平均波长、光谱宽度的影响, 然后基于理论模型, 利用实测数据计算光纤弯曲对 FOG 标度因数稳定性和随机游走系数的影响。实验系统如图 1 所示, 光纤缠绕在不同直径的圆柱上, 实现不同的弯曲情况, 圆柱由硬纸转成, 如放大图所示。光源选用自制的高稳定超荧光光纤光源(SFS), 在实验条件下, SFS 功率为 10.3 mW, 3 dB带宽为 41.1 nm, 功率稳定性优于 10^{-4} dB, 平均波长稳定性优于 3×10^{-6} 。为模拟在 FOG 中的实际情况, 弯曲圈数取 10 圈, 弯曲半径从 2~12 mm 取值, 间隔 1 mm, 用光功率计 FPM-8210 测量光功率, 用光谱仪 AQ6370 测量光谱, 对于每种弯曲情况下的平均波长等时间间隔连续测量 15 次, 求出平均值作为平均波长的测量值, 最大值与最小值的差值除以平均值作为平均波长波动。所用光纤样品外径均为 125 μm , SMF 光纤样品为通用的光纤, 在 SFS 中有使用, 数值孔径值为 0.11, 其他三种光纤为光纤陀螺使用定制, 数值孔径值为 0.13。实验测得弯曲损耗、平均波长变化量、光谱宽度变化量及平均波长波动量随弯曲半径变化如图 2 所示, 采用 PCF 和 PMPCF 时, 变化量很小, 为了显示变化细节, 图 3 显示的曲线是将原值放大 10 倍后绘制的。

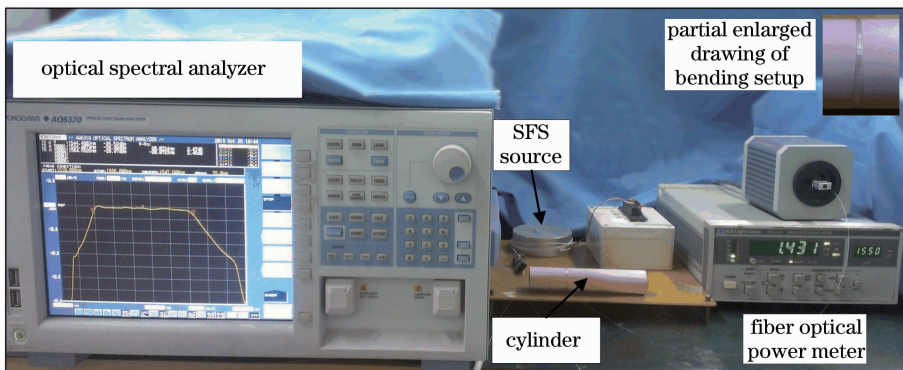


图 1 实验系统结构图

Fig. 1 Experimental setup

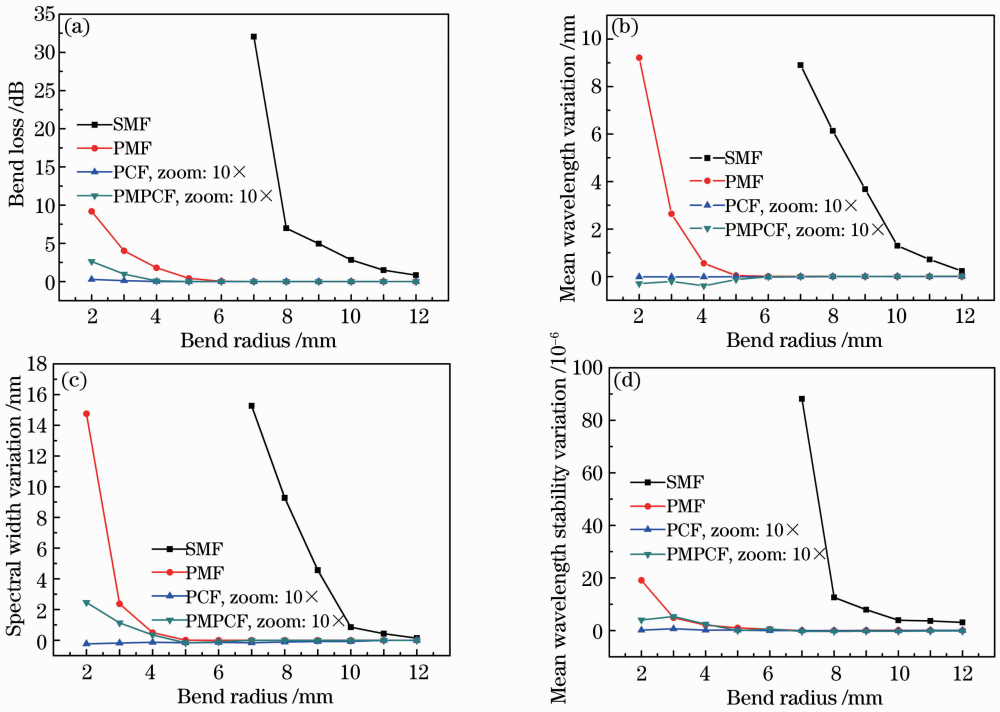


图2 弯曲半径与(a)弯曲损耗、(b)平均波长变化量、(c)光谱宽度变化量和(d)平均波长相对变化量的关系曲线
Fig.2 Impacts of bend radius on (a) bend loss, (b) mean wavelength variation, (c) spectral width variation and (d) mean wavelength relative variation

从图 2(a)~(c)可以看出,PCF 和 PMPCF 对于光纤弯曲不敏感,其中 PCF 比 PMPCF 抗弯曲能力更好,可能是 PMPCF 中的对称大孔引起的;专为陀螺设计的 PMF 弯曲特性相对较好,弯曲半径临界值约为 5 mm;通用 SMF 最差,弯曲半径临界值约为 12 mm。且当弯曲半径小于临界值时,输出功率和平均波长呈现较大的波动,其中平均波长波动情况如图 2(d)所示,这种波动会直接导致陀螺噪声和标度因数误差的增加,且在环境发生变化时,这种波动的影响还会被放大,进而严重影响陀螺的稳定性和其他性能。

根据测量数据,以一种典型的高精度光纤陀螺为对象,利用(2)~(4)式对随机游走系数和标度误差进行了计算,其中陀螺参数如表 1 所示,计算结果如图 3、4 所示。为了显示 PCF 和 PMPCF 对应曲线的变化细节,图 3、4 中曲线将原值放大了 10 倍,其中图 4 中插图为虚线部分的再放大图。

由图 3 可知,选用 PCF 和 PMPCF 为传输光纤时,由于其对弯曲不敏感,对陀螺 RWC 基本没有影响;当 PMF 弯曲半径小于临界值时,引起的 RWC 明显变大;同样,当 SMF 弯曲半径小于临界值时,引起的 RWC 快速上升。图 4 显示了弯曲引起的 SF 误差变化情况,与图 3 对应,SF 不稳定性在光纤

表 1 高精度 FOG 典型参数

Table 1 Typical parameters of high precision FOG

Parameter	Value
Coil length L / m	1000
Coil diameter D / m	0.12
Detector power P_0 / μ W	10
Detector responsivity R_D / (A/W)	0.9
Phase bias point	$\pi/2$
Temperature T / K	303
Detector trans-impedance R_n / k Ω	10
Detector dark current i_{dark} / nA	5

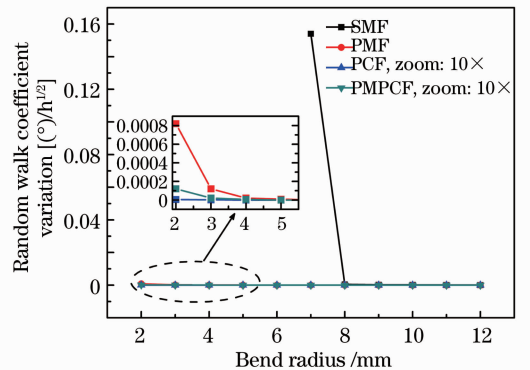


图 3 随机游走系数变化量与弯曲半径的关系曲线

Fig.3 Impact of bend radius on RWC

弯曲半径小于临界值时,明显变大。计算表明,在采用 PCF 或 PMPCF 后,由弯曲引起的 SF 误差均小于 1×10^{-6} 。

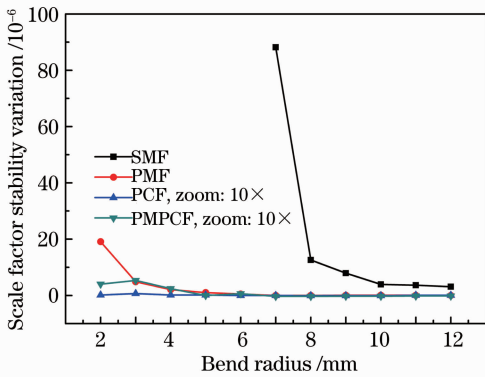


图 4 标度因数变化量与弯曲半径的关系曲线
Fig. 4 Impact of bend radius on SF

4 结 论

以高精度光纤陀螺应用为背景,选取 SMF、PMF、PCF 和 PMPCF 为研究对象,采用自制的 SFS,分别从理论和实验上研究了光纤弯曲时,弯曲损耗、平均波长变化量、光谱宽度变化量及平均波长波动量,及其对光纤陀螺性能的影响。研究表明,采用光子晶体光纤时,光纤弯曲对弯曲损耗、平均波长变化量、光谱宽度变化量及平均波长波动量影响很小,对光纤陀螺性能也几乎没有影响,采用其他光纤时,临界弯曲半径较大(PMF 约为 5 mm, SMF 约为 12 mm),在小于临界弯曲半径时,影响显著,因而在陀螺设计和装配时需要严格控制光路中的光纤弯曲半径。此结果对高精度光纤陀螺的设计和制作都具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Hangen Renner. Bending loss of coated single-mode fibers: a simple approach [J]. J Lightwave Technol, 1992, 10(5): 544-551.
- 2 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. Opt Lett, 1997, 22(13): 961-963.

- 3 T Sorensen, J Broeng, A Bjarklev, *et al.*. Spectral macro-bending loss considerations for photonic crystal fibers [J]. IEEE Proceedings-Optoelectronics, 2002, 149(5-6): 206-210.
- 4 M D Nielsen, N A Mortensen, M Albertsen, *et al.*. Predicting macrobending loss for large-mode area photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2004, 12(8): 1775-1779.
- 5 Jacek Olszewski, Marcin Szpulak, Wacław Urbanczyk. Effect of coupling between fundamental and cladding modes on bending losses in photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2005, 13(16): 6015-6022.
- 6 Guo Xiarui, Yang Dexing. Experimental investigation on microbending loss properties in air-guiding photonic bandgap fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2432-2436.
- 郭夏锐, 杨德兴. 带隙型光子晶体光纤微观弯曲传输损耗特性 [J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2432-2436.
- 7 Cui Li, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan, *et al.*. Analysis of bending loss oscillations in photonic crystal fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1172-1177.
- 崔 莉, 赵建林, 张晓娟, 等. 光子晶体光纤的弯曲损耗振荡特性分析 [J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1172-1177.
- 8 T Martynliën, J Olszewski, M Szpulak, *et al.*. Experimental investigations of bending loss oscillations in large mode area photonic crystal fibers [J]. Opt Express, 2007, 15(21): 13547-13556.
- 9 Yukihiko Tsuchida, Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses [J]. Opt Express, 2005, 13(12): 4770-4779.
- 10 Yanping Xu, Ping Lu, Zengguang Qin, *et al.*. Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3031-3042.
- 11 Wang Wei. Interferometric Fiber Optical Gyroscope Technology [M]. Beijing: Chinese Aerospace Press, 2010. 115-116.
- 王 巍. 干涉型光纤陀螺仪技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 115-116.
- 12 Honghai Wang, Feng Tu, Jing Li. Effect of temperature and bending on PANDA polarization-maintaining fibers fabricated by PCVD method [C]. Photonics Global, 2008.
- 13 Wu Weifeng. Investigation on Bend Loss of PANDA Polarization Maintaining Fibers [D]. Nanjing: Nanjing University of Science of Technology, 2009. 29-43.
- 吴卫锋. 熊猫型保偏光纤弯曲损耗的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009. 29-43.
- 14 Li Xuyou, Yang Hanrui, Gao Yanbin. High-birefringent photonic crystal fibers with small effective mode area [J]. J Chinese Inertial Technology, 2012, 20(6): 715-719.
- 李绪友, 杨汉瑞, 高延滨. 具有小有效面积的高双折射光子晶体光纤 [J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(6): 715-719.

栏目编辑: 王晓玻