

光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究

李 晶, 王 巍, 王学锋, 杨学礼

(北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

摘 要: 光子晶体光纤陀螺原理上具有磁敏感性低、温度稳定性好及抗辐照等特点, 是光纤陀螺一个新的重要发展方向。很多学者研究了其零偏特性, 但未见对其标度因数的研究报道。研究了光子晶体光纤陀螺标度因数的误差构成, 并试验测量了光子晶体光纤环引入的误差。研究结果表明, 光子晶体光纤陀螺标度因数具有更稳定的温度和辐照特性, 在 $-40\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 标度因数重复性为 242.3×10^{-6} (未补偿时), 约为普通光纤陀螺的 1/2。在经历总剂量为 50 krad(Si) 的辐照后, 光纤陀螺标度因数变化 109×10^{-6} , 重复性和非线性没有明显变化, 比普通光纤陀螺稳定 1 倍以上。

关键词: 光子晶体光纤陀螺; 标度因数; 温度; 辐照

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4082-06

Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope

Li Jing, Wang Wei, Wang Xuefeng, Yang Xueli

(Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: Photonic crystal fiber-optic gyroscope(PCFOG) has become an important developing direction of FOG due to its low magnetic sensitivity, good temperature stability, and anti-radiation capability in principle. Researchers have studied a lot on the bias characteristics of PCFOG, however, no work has been done on its scale factor performance. In this paper, the factors that lead to scale factor error of PCFOG were analyzed and the error induced by photonic crystal fiber coil was experimentally tested. The results show that PCFOG has better temperature and radiation stabilities than ordinary FOG. Within a temperature range of $-40\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, the scale factor repeatability of the PCFOG is 242.3×10^{-6} without compensation which is almost half of the conventional FOG; After a total dose of 50 krad (Si) radiation, the scale factor shifts 109×10^{-6} and no notable changes are observed with the repeatability and nonlinearity. Therefore, the PCFOG shows one time better stability than conventional FOG.

Key words: photonic crystal fiber-optic gyroscope; scale factor; temperature; radiation

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 科工局“十二五”预研项目

作者简介: 李晶(1973-), 女, 博士生, 从事光纤陀螺技术方面的研究。Email: lijing_lu@sina.com

导师简介: 王巍(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事新型惯性技术方面的研究。Email: yfwangwei@vip.sina.com

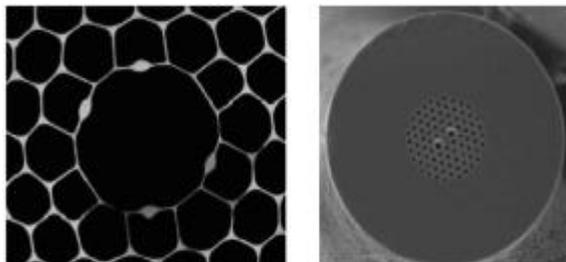
0 引 言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的惯性仪表,优点是全固态,没有旋转和摩擦部件,原理上可靠性高,寿命长,动态范围大,启动快,结构简单,抗冲击和振动等,已成为航天、航空、航海和陆用领域中广泛使用的主流惯性仪表。

从陀螺方案上来说,目前最普遍应用的是全数字闭环方案,光纤环采用普通保偏光纤,即 1979 年 Kaminow 等人提出的应力型保偏光纤,通过在光纤纤芯附近引入两个对称的应力区来增大两个偏振模之间的折射率差,从而减小模式耦合效应。根据应力区形状的不同,分为熊猫型(Panda)、领结型(Bowtie)、椭圆包层(Tiger)和椭圆芯型(Elliptical-core)。

随着光子晶体技术的发展,采用光子晶体光纤成为光纤陀螺一个新的发展趋势。2006 年,DRAPER 实验室报道了光子晶体光纤陀螺的常温特性,测量地速的误差为 $0.02 (^{\circ})/h^{[3]}$ 。2011 年,北京航空航天大学报道了光子晶体光纤陀螺零偏的温度特性^[4]。零偏、噪声和标度因数是光纤陀螺的关键技术指标,以上研究均针对陀螺的零偏和噪声,参考文献[5]报道了普通闭环光纤陀螺的标度因素温度稳定性,目前未见研究光子晶体光纤陀螺标度因数特性的相关报道,这正是文中研究的内容。

光子晶体光纤也称为微结构光纤,由纯 SiO₂ 和空气孔有规律的排列而成,从导光机制的角度,可将其分为折射率导引型(TIR-PCF)和光子带隙型(PB-PCF) 两类。典型保偏光子晶体光纤的端面结构如图 1 所示。由于国内还未成功研制 PB-PCF,论文研究的光子晶体光纤陀螺采用 TIR-PCF。



(a) PB-PCF (b) TIR-PCF

图 1 典型保偏光子晶体光纤端面

Fig.1 Cross section of polarization maintaining photonic crystal fiber

1 光子晶体光纤陀螺及其标度因数构成

光子晶体光纤陀螺同普通光纤陀螺的工作原理相同,也是利用 Sagnac 效应,即光纤环中相向传输的两束光之间的相位差正比于旋转角速度:

$$\varphi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda C} \Omega \quad (1)$$

式中: φ_s 为相位差; L 为光纤环长度; D 为光纤环平均直径; λ 为光源的平均波长; Ω 为旋转角速度。光子晶体光纤陀螺中,由光子晶体光纤代替了普通保偏光纤。这一变化涉及到构成光纤陀螺光路的所有器件,但就光子晶体光纤发展的现状而言,光子晶体光纤器件还很不成熟,最现实的仍然是只采用光子晶体光纤环,闭环光子晶体光纤陀螺的构成如图 2 所示。

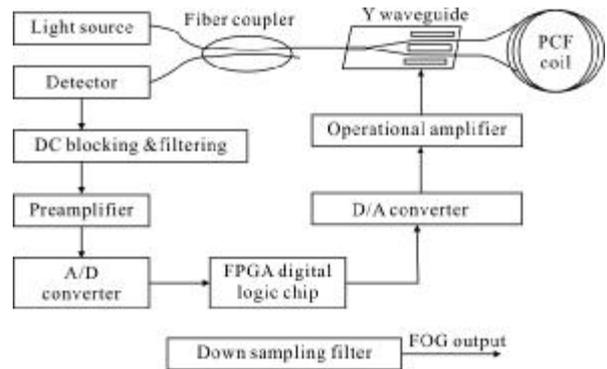


图 2 光子晶体光纤陀螺的原理示意图

Fig.2 Principle of photonic crystal fiber-optic gyroscope

光纤陀螺的标度因数是陀螺输出的数字量和输入角速度之间的比例因子^[6]:

$$K_{SF} = \frac{D_{FB}}{\Omega} = \frac{2\pi LD}{\lambda C} \cdot \frac{1}{K_{DA} \cdot K_M} \quad (2)$$

式中: K_{DA} 为 D/A 转换器及其放大器的增益; $K_M = \pi/V_{\pi}$ 为 Y 波导的调制系数, V_{π} 为 Y 波导的半波电压,可以表示为:

$$V_{\pi} = \frac{\lambda}{n_e \gamma_{33} L_e} \frac{G}{\Gamma} \quad (3)$$

式中: λ 、 G 、 n_e 、 γ_{33} 、 L_e 分别表示真空中波长、电极间隙、波导非寻常折射率、电光系数和推挽电极总长度; Γ 为电场与光场的重叠因子。

综合公式(2)和(3),可以将光纤陀螺的标度因数表示为:

$$K = \frac{D_{FB}}{\Omega} = \frac{2\pi}{c} \cdot \frac{LD}{K_{DA} \cdot K'_M} \quad (4)$$

其中, $K'_M = K_M / \lambda$ 是由 Y 波导材料和结构决定的系数。

2 光子晶体光纤陀螺标度因数误差分析

从公式(4)分析, 标度因数误差可以表示为:

$$\Delta K/K = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D}{D} - \frac{\Delta K_{DA}}{K_{DA}} - \frac{\Delta K'_M}{K'_M} \quad (5)$$

因为光子晶体光纤陀螺和普通光纤陀螺的调制解调相同, 因而文章重点分析光路参数对标度因数的影响。

从公式(5)可以看出, 在光路上, 标度因数只与 L 和 D 相关, 而与波长无关, 这个结果仅当陀螺中的数字阶梯波可以无限增高时成立, 实际上, 数字闭环光纤陀螺中存在 2π 复位, 这导致了标度因数误差。

(1) $\Delta L/L$

在采用模拟数字斜波调制方案时, 光纤的折射率值 n 构成陀螺标度因数的一部分, 而在全数字闭环方案中, 利用数字斜波和一个稳定的电子时钟, 标度因数基本上只与线圈几何长度上的 Sagnac 效应有关。石英的温度系数为 $10^{-6}/^\circ\text{C}$, 光子晶体光纤由纯石英构成, 其长度的温度系数应与石英相当, 普通光纤的纤芯中掺锗, 包层中掺硼, 锗的膨胀系数约为 $6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 硼的膨胀系数约为 $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 但由于掺杂的浓度通常比较低, 对光纤长度的温度系数影响应该不大。

(2) $\Delta D/D$

ΔD 是与光纤环骨架材料、固化胶粘剂及光纤的温度系数相关, 可以表示为:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta D_m + \Delta D_g + \Delta D_f}{D} \quad (6)$$

式中: $\Delta D_m/D$ 为骨架引起的平均直径的变化, 与骨架材料相关, 如果采用不锈钢骨架, 其值为 $16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 若采用钛合金骨架, 其值为 $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。当然, 如果采用无骨架光纤环, 则无该项误差。 $\Delta D_g/D$ 为固化胶引起的平均直径的变化, 其值通常为几十至几百 $10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\Delta D_f/D$ 为光纤膨胀引起的平均直径的变化, 假定光纤纵向的膨胀系数和横向的膨胀系数相当, 则该值可以

采用 $\Delta L/L$ 的结果。实际上, 直径的变化量并没有这么大, 主要原因是光纤限制或是吸收了骨架和固化胶的膨胀。

(3) $\Delta \lambda/\lambda$

$\Delta \lambda/\lambda$ 由两部分构成, 一部分是光源平均波长的波动, 一部分是光纤环谱损耗的波动。从公式(5)看, 平均波长变化对陀螺标度因数没有影响, 这是因为光纤陀螺闭环反馈回路中存在的 Y 波导调制系数也和波长成正比。实际上, 光纤陀螺闭环工作过程中, 存在着 2π 复位, 假设反馈相位经过 $m+n$ 次积分后刚好达到 2π , m 和 n 是与调制深度有关的系数, 则复位前的 m 个时钟周期内, 光纤陀螺的归一化输出为:

$$S(t) = 1 + \cos(\phi_b + \phi_s + \phi_f) \quad (7)$$

在复位后的 n 个时钟周期内, 归一化输出为:

$$S_R(t) = 1 + \cos(\phi_b + \phi_s + (\phi_f - 2\pi)) \quad (8)$$

当波长变化 $\varepsilon \lambda$ 时, 复位前后归一化输出分别为:

$$S'(t) = 1 + \cos(\phi_b + \phi_s(1 - \varepsilon) + \phi_f(1 - \varepsilon)) \quad (9)$$

$$S'_R(t) = 1 + \cos(\phi_b + \phi_s(1 - \varepsilon) + (\phi_f - 2\pi)(1 - \varepsilon)) \quad (10)$$

平均误差为:

$$\langle \Delta S \rangle = \frac{m(S(t) - S'(t)) + n(S_R(t) - S'_R(t))}{m+n} = \frac{n \sin \phi_b \sin 2\pi \varepsilon + 2n \cos \phi_b \sin^2(2\pi \varepsilon)}{m+n} \quad (11)$$

式中: 考虑 ε 是个小量, 认为 $\sin 2\pi \varepsilon \approx 2\pi \varepsilon$, 且忽略 ε^2 项, 则:

$$\langle \Delta S \rangle = \frac{n \sin \phi_b}{m+n} \cdot 2\pi \varepsilon = \alpha \cdot 2\pi \varepsilon \quad (12)$$

误差系数 α 与调制深度的关系如图 3 所示。可见, 标度因数误差与波长的变化量成正比, 且随着调制深度的增加先增大后减小。

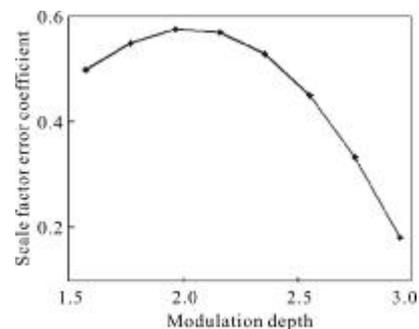


图 3 标度因数误差系数和调制深度的关系

Fig.3 Relationship between scale-factor error and modulation depth

3 实验结果及讨论

3.1 实验概述

研究采用的光子晶体光纤端面结构如图 4 所示,大孔直径: $d_1=5.6\ \mu\text{m}$;小孔直径: $d=2.8\ \mu\text{m}$;纤芯周围空气孔层数: $N=5$;相邻空气孔间距: $\Lambda=5.2\ \mu\text{m}$ 。

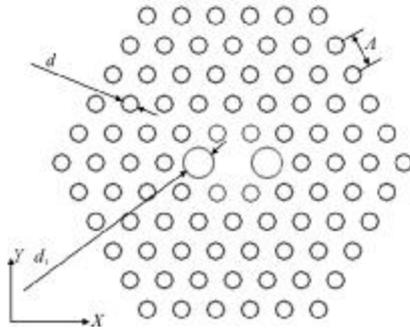


图 4 光纤的端面结构

Fig.4 Configurations of the photonic crystal fiber cross sections

参考文献[7]研究了光子晶体光纤的拉锥,还不能制成光纤耦合器,参考文献[8]也只是初步研究了掺铒光子晶体光纤光源。考虑到光子晶体光纤器件的现实情况,光纤陀螺采用 500 m 光子晶体光纤,采用普通的掺铒光纤光源,平均波长为 1542 nm, Y 波导的尾纤为熊猫光纤。电路方案上,陀螺中未采用光控及增益闭环控制措施,陀螺调制在 $\pi/2$ 工作点。

3.2 光纤环的 LD 值

为得到光纤环准确的物理长度,采用测试其光程然后去除折射率影响的方法,其中折射率的变化按照 $-1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 计算。光纤环的骨架采用钢材,其热胀系数为 $16 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,其引起的光纤长度的变化与其膨胀系数相同。具体的测试结果见表 1,这意味着光子晶体光纤本身长度的变化系数为 $2.68 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,熊

表 1 光纤环长度随温度变化

Tab.1 Length of coil with temperature

| Temperature/ $^\circ\text{C}$ | PCF coil/m | Panda fiber coil/m |
|---|------------|--------------------|
| -40 | 502.151 | 496.587 |
| 25 | 502.377 | 496.925 |
| 70 | 502.631 | 497.200 |
| Variation/ $\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ | 8.68 | 11.22 |

猫光纤的长度变化系数为 $5.22 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

将光子晶体光纤和普通光纤采用相同的胶黏剂制作样本,在 $-40 \sim +70\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内,采用 Q300TCT 测试其直径变化,光子晶体光纤环的平均直径变化量为 $4.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,熊猫型光纤环的平均直径变化量为 $5.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

3.3 光纤环的谱损耗

光子晶体光纤和普通光纤在 $-40 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内的谱损耗引起的平均波长变化分别如图 5、图 6 所示。光子晶体光纤损耗谱平均波长全温变化 0.03 nm,稳定性明显优于普通熊猫型保偏光纤环的 0.05 nm。

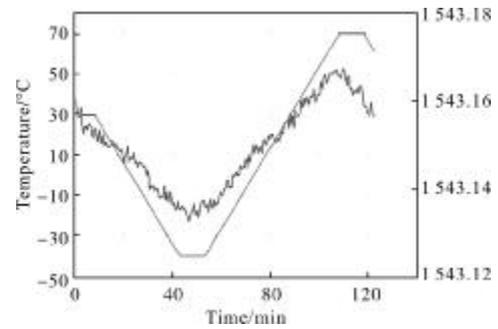


图 5 光子晶体光纤平均波长的温度稳定性

Fig.5 Mean wavelength varieties of photonic crystal fiber coil in temperature

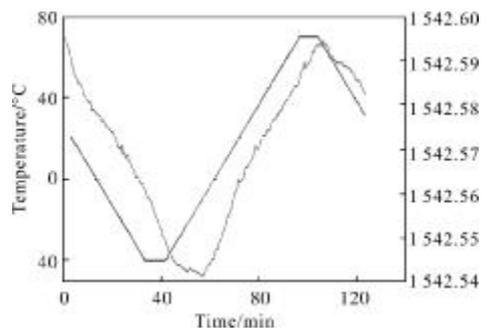


图 6 普通光纤平均波长的温度稳定性

Fig.6 Mean wavelength varieties of traditional fiber coil in temperature

采用 $0.8\ \text{rad/s}$ 的剂量率,辐照总剂量达到 50 krad (Si) 时,光纤环损耗谱平均波长随总剂量的变化如图 7、图 8 所示。光子晶体光纤环平均波长变化小于 $0.02\ \text{nm}$,普通熊猫型保偏光纤环平均波长变化为 $0.2 \sim 0.35\ \text{nm}$,光子晶体光纤环谱损耗的稳定性明显高于普通光纤环。

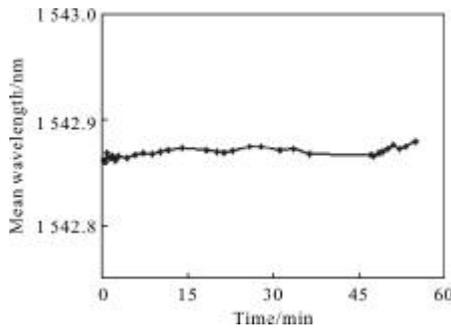


图 7 光子晶体光纤平均波长的辐照特性

Fig.7 Mean wavelength varieties of photonic crystal fiber coil in radiation

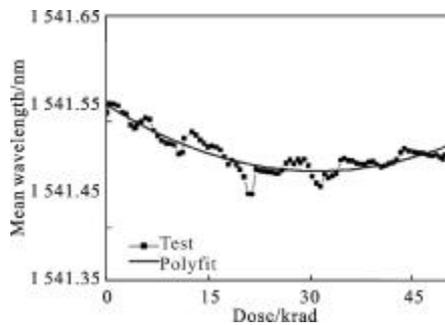


图 8 普通光纤平均波长的辐照特性

Fig.8 Mean wavelength varieties of traditional fiber coil in radiation

3.4 光子晶体光纤陀螺标度因数温度特性

在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内对光子晶体光纤陀螺进行标定, 标度因数标准偏差为 242.3×10^{-6} (未补偿), 是同类型普通光纤陀螺的 1/2 左右, 补偿后标准偏差为 9×10^{-6} , 具有更好的温度稳定性。具体结果如图 9 所示。

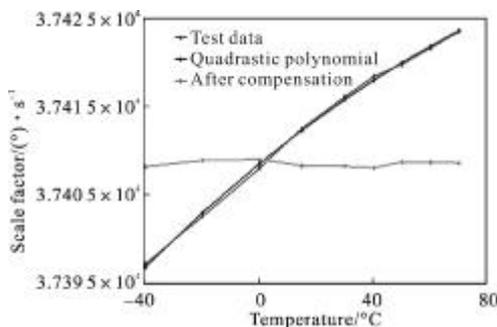


图 9 标度因数随温度的变化

Fig.9 Varieties of scale factor in temperature

各因素在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内的变化量及其引起的标度因数误差如表 2 所示, 陀螺标度因数实测的结果与采用各因素计算分析的结果基本相符。

表 2 标度因数误差

Tab.2 Errors of scale factor

| Parameters | Parameter variation within whole temperature range | Sacle-factor error |
|---------------------------------|--|------------------------|
| Mean wavelength of light source | -198×10^{-6} | -198×10^{-6} |
| Mean wavelength of fiber coil | 19.4×10^{-6} | 19.4×10^{-6} |
| Fiber length | 294.8×10^{-6} | 294.8×10^{-6} |
| Mean diameter of fiber coil | 506×10^{-6} | 506×10^{-6} |
| Modulation coefficient of Y | $68\ 000\times 10^{-6}$ | -314.4×10^{-6} |
| Gain of D/A converter | 15×10^{-6} | $<1\times 10^{-6}$ |
| Total scale factor error | - | 307.8×10^{-6} |

3.5 光子晶体光纤陀螺标度因数辐照特性

对光子晶体光纤陀螺进行了辐照试验, 辐照过程中, 对电路进行了屏蔽处理, 将光路置于辐照环境中, 辐照剂量率为 0.083 rad/s , 总剂量为 50 krad(Si) 。在辐照试验前后, 对光子晶体光纤陀螺的标度因数进行了标定, 辐照前, 标度因数为 $37\ 413.54\ (^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$, 标度因数非线性为 0.73×10^{-6} , 重复性为 2.65×10^{-6} , 辐照后, 标度因数为 $37\ 413.63\ (^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$, 标度因数非线性为 0.87×10^{-6} , 重复性为 2.57×10^{-6} , 辐照前后, 标度因数非线性和重复性均无明显变化, 标度因数数值变化了 109×10^{-6} , 相比于普通光纤陀螺变化量约小 1 倍。具体结果见表 3。分析其原因, 标度因数的变化主要

表 3 辐照前后陀螺标度因数性能

Tab.3 Scale factor before and after radiation

| No. | Scale factor $/(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ | | Nonlinearity | |
|---------------|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Before-Rd | After-Rd | Before-Rd | After-Rd |
| 1 | 37 413.70 | 37 417.68 | 0.77×10^{-6} | 0.82×10^{-6} |
| 2 | 37 413.58 | 37 417.77 | 0.55×10^{-6} | 0.84×10^{-6} |
| 3 | 37 413.57 | 37 417.55 | 0.79×10^{-6} | 1.03×10^{-6} |
| 4 | 37 413.41 | 37 417.71 | 0.69×10^{-6} | 0.87×10^{-6} |
| 5 | 37 413.50 | 37 417.57 | 0.81×10^{-6} | 0.90×10^{-6} |
| 6 | 37 413.49 | 37 417.54 | 0.76×10^{-6} | 0.79×10^{-6} |
| Mean | 37 413.54 | 37 417.63 | 0.73×10^{-6} | 0.87×10^{-6} |
| Repeatability | 2.65×10^{-6} | 2.57×10^{-6} | | |

由光源和光纤环谱损耗造成的平均波长的变化引起,光源与普通光纤陀螺相同,该差异主要由光纤环的谱损耗引起的平均波长漂移造成的。

4 结 论

文中分析了影响光子晶体光纤陀螺标度因数的因素,并对光纤长度、光纤环平均直径、光纤环光谱等因素影响进行了实际测量,评估了其引起的光纤陀螺标度因数误差,实际测试的光子晶体光纤陀螺标度因数受温度和辐照的影响与各因素分析计算的结果基本相符,均比普通光纤陀螺稳定 1 倍以上。

参考文献:

- [1] Hyang Kyun Kim. Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24, (8): 3169-3174.
- [2] Michel Digonnet, St'ephane Blin. Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope [J]. *Meas Sci Technol*, 2007, 18: 3089-3097.
- [3] Tawney J, Hakimi F, Willig R L. Photonic crystal fiber IFOGs[C]//OSA/OFS, 2006, ME8.
- [4] Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao, et al. Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1143-1147. (in Chinese)
- [5] 杨远洪, 段玮倩, 叶森, 等. 光子晶体光纤陀螺技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1143-1147.
- [5] Wu Yanji, Huang Xianlin. Study on temperature stability of scale-factor in closed-loop fiber optical gyroscope [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(7): 618-620. (in Chinese)
- [5] 吴衍记, 黄显林. 闭环光纤陀螺标度因数的温度稳定性研究[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(7): 618-620.
- [6] Wang Wei. Interferometric Fiber Optic Gyroscope Technology [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010: 422-432. (in Chinese)
- [6] 王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010: 422-432.
- [7] Xi Xiaoming, Sun Guilin, Chen Zilun, et al. Photonic crystal fibers tapering based on the conventional taper rig [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1481-1484. (in Chinese)
- [7] 奚小明, 孙桂林, 陈子伦. 利用普通熔融拉锥机实现光子晶体光纤拉锥[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1481-1484.
- [8] Wu Xu, Ruan Shuangchen, Liu Chengxiang. Erbium-doped photonic crystal fiber superfluorescent sources in double-pass forward configuration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1481-1484. (in Chinese)
- [8] 吴旭, 阮双琛, 刘承香. 双程前向掺铒光子晶体光纤超荧光光源[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1481-1484.