

# 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究

杨远洪, 杨福铃, 陆林, 李慧, 李帅

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 为满足空间和其他领域的高精度制导导航控制系统的迫切需求,开展了基于实芯保偏光子晶体光纤(PM-PCFs)的干涉型光子晶体光纤陀螺(PCFOG)的技术研究,研究和开发了PCFOG专用PM-PCFs和掺铒PCFs(ED-PCFs)的制备技术、PCFs耦合技术和熔接工艺等关键技术,研制出了PCFOG原型样机并进行了典型环境实验。研究表明,PCFOG在精度和环境适应性等方面都具备明显优势,具备工程应用条件。

**关键词** 遥感; 光子晶体光纤; 光纤陀螺; 温度; 辐射

**中图分类号** V241.5

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0328004

## Research on Interferometer Photonic Crystal Fiber Optic Gyroscope Technology

Yang Yuanhong, Yang Fuling, Lu Lin, Li Hui, Li Shuai

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** To meet the urgent needs of high-precision guidance, navigation and control systems in space and other fields, the research of interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope (PCFOG) based on solid core polarization maintaining photonic crystal fiber (PM-PCFs) is carried out. Some key technologies, such as the fabrication technology of PM-PCFs and erbium-doped PCFs (ED-PCFs) for PCFOG, the coupling technology and the fusion technology of PCFs, are studied and developed. The prototype of PCFOG is developed and the typical environmental tests are carried out. The results show that PCFOG has obvious advantages in accuracy and environmental adaptability, and satisfies the conditions of engineering application.

**Key words** remote sensing; photonic crystal fibers; fiber optic gyroscope; temperature; radiation

**OCIS codes** 280.4991; 060.2800; 060.2370; 060.2300; 120.4800

## 1 引 言

光纤陀螺(FOG)是一种基于萨尼亚克效应的全固态、真正静音的陀螺,具有可靠性高、寿命长、动态范围宽、抗冲击与振动、体积小、质量轻、适合大批量生产等特点,可达到很高的精度,已开始在海、陆、空、天领域广泛应用<sup>[1-2]</sup>。目前 FOG 光路普遍采用熊猫型、领结型或椭圆包层等应力型保偏光纤(PMFs),这类 PMFs 普遍对温度、磁场、辐照等敏感,因此很难进一步提高 FOG 的性能。通过优化结构及热设计、更精细的光纤环的绕制、更完善的信

号检测方案及有效的屏蔽技术,可以较好地解决上述问题,但这些技术和措施也使 FOG 更加复杂<sup>[3-5]</sup>。1987年, Yablonoitch<sup>[6]</sup>提出了光子晶体的概念。Knight等<sup>[7-8]</sup>在1996年和1998年分别研制出实芯光子晶体光纤(PCFs)和空芯PCFs(HCFs)。2000年, Ortigosa-Blanch等<sup>[9]</sup>研制出保偏PCFs(PM-PCFs)。2004年, Chen等<sup>[10]</sup>研制出空芯保偏PCFs(PM-HCFs)。由于PCFs是由单一材料制成的微结构光纤,具备对温度、磁场、空间辐射等环境因素敏感度低的特性,其色散可控,克尔效应低,对弯曲不敏感。而且实芯的PCFs具备无限

**收稿日期:** 2017-10-30; **收到修改稿日期:** 2017-11-10

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、国家自然科学基金(61227902, U1637106)、航空科学基金(20140851012)、教育部创新团队发展计划(IRT1203)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金(2016GZKF001)

**作者简介:** 杨远洪(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤陀螺及其相关技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn

单模传输能力,在 HCFs 中,光波可等效于在真空中传输。这些特性都是研制高性能 FOG 所必须的,PCFs 一经出现,便被认为是组成 FOG 光路的理想光纤材料<sup>[11-12]</sup>。

从 2005 年开始,国外多家研究单位将 HCFs 用于干涉型 FOG(IFOG)和谐振型 FOG(R-FOG)中,并陆续报道了相关的研究结果。其中斯坦福大学、Draper 实验室等陆续报道了基于 HCFs 的 IFOG 的研究进展<sup>[13-17]</sup>,通过理论和实验研究验证了采用 PCFs 研制 FOG 的独特优势和实现高精度 FOG 制造的潜力;同时,霍尼韦尔公司和斯坦福大学也致力于基于 HCFs 的 R-FOG<sup>[18-20]</sup>,结果表明基于 HCFs 的 R-FOG 已具备实现惯性级精度的条件。近年来,北京航空航天大学 and 浙江大学等高校也开展了基于 HCFs 的 R-FOG 研究<sup>[21-22]</sup>,取得了较大进展。然而,由于 HCFs 技术尚不成熟,很难获得质量好的长 HCFs,相关的研究还停留在实验室原理演示阶段。为满足空间和其他高精度制导导航控制系统对高精度、抗辐射 FOG 的迫切需求,2005 年,本课题组提出基于实芯 PM-PCFs 和掺铒 PCFs(ED-PCFs)的干涉型光子晶体 FOG(PCFOG)方案,并进行了全面的方案和技术验证<sup>[23]</sup>。本课题组在专用光纤材料、耦合器方案、保偏熔接等技术方面开展了全面深入的研究并取得突破性进展<sup>[24-26]</sup>,2012 年,采用国产专用实芯 PM-PCFs 和 ED-PCFs 研制出 IFOG 原型样机<sup>[23]</sup>,并于 2014 年通过鉴定。目前,国内多家 FOG 研究单位,如哈尔滨工程大学、北京航天时代光电科技有限公司和航天科工 33 所等,也针对类似方案开展了技术研究<sup>[27-30]</sup>。经过约 10 年的研究攻关,国内基于实芯 PM-PCFs 的 PCFOG 技术得到迅速发展,其中北京航空航天大学 and 北京航天时代光电科技有限公司研制的 PCFOG 已进入卫星搭载实验阶段。另外,PCFOG 研究还推动了国内 PM-PCFs 和 ED-PCFs 光纤材料的发展,长飞公司、长盈通公司、烽火公司和华中科技大学等单位研制出实用的 PM-PCFs 和 ED-PCFs<sup>[31-32]</sup>,北京航空航天大学 and 深圳大学开展了 ED-PCFs 光纤光源的研发<sup>[23,33]</sup>,并在 PCFOG 中得到成功应用。

本文以研制具备工程应用条件的 PCFOG 为目的,开展了 PCFOG 专用 PM-PCFs 和 ED-PCFs 参数优化和制作技术的研究;提出了基于锥面的多芯耦合技术;开发了 PM-PCFs 模场预熔微调工艺,获得了 PM-PCFs 低损耗高消光比熔接技术和工艺;采用新型的 ED-PCFs 研制出高稳定性光纤光源。

在此基础上,开发出高性能 PCFOG,通过典型环境实验,测试发现该 PCFOG 满足工程应用条件。

## 2 PCFOG 关键技术研究

### 2.1 PCFOG 方案

适合 PCFOG 的 PCFs 主要有两种,即实芯结构的 PM-PCFs 和空芯带隙结构的 HCFs,如图 1 所示。PM-PCFs 具有损耗低、无限单模和偏振保持能力强等特点,而且制作技术成熟,已具备批量生产条件,成本低;HCFs 具有更低的温度、磁场和辐射敏感性,但制作难度大,很难获得满足应用的长 HCFs,而且损耗大、成本高。因此,尽管 HCFs 可能更适合 PCFOG,但是综合考虑各方面的因素,最终选择不同于国外基于 HCFs 的 IFOG 方案。所提出的 PCFOG 的基本方案如图 2 所示,该 PCFOG 为闭环保偏 PCFOG 结构,采用实芯 PM-PCFs 绕制光纤环,采用 ED-PCFs 制作宽谱光纤光源(SFS)。由于光纤环和光纤光源为 FOG 的核心部件,决定着 FOG 的性能,因此将这两部分换成实芯 PCFs 材料,不但能明显提升 FOG 的温度稳定性和空间辐射能力,而且具备很强的实用性。

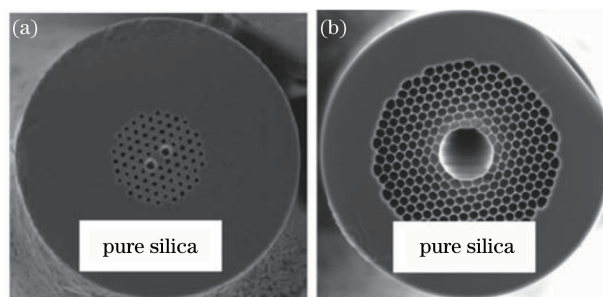


图 1 端面图。(a)PM-PCFs; (b)HCFs

Fig. 1 Section images. (a)PM-PCFs; (b)HCFs

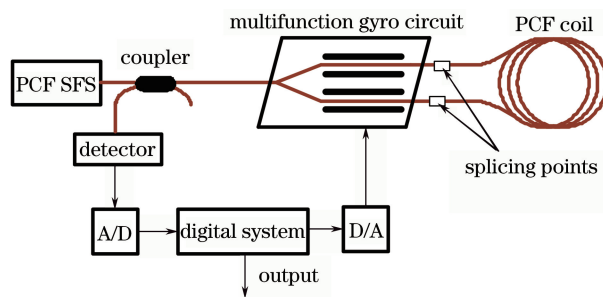


图 2 PCFOG 基本方案

Fig. 2 Basic configuration of PCFOG

### 2.2 专用 PCF 材料研制

#### 2.2.1 PCFOG 用 PM-PCFs 研究

##### 2.2.1.1 双折射温度不敏感 PM-PCFs 参数优化

典型的 PM-PCFs 结构如图 3 所示, $D$  为大孔

直径,  $d$  为小孔直径,  $\Lambda$  为小孔间距。市场上能买到的一般为通用 PM-PCFs, 其结构和性能并不满足 PCFOG 要求。为此, 利用有限元法仿真研究了热光效应和热膨胀效应对 PM-PCFs 双折射温度敏感系数的影响。为了简化仿真复杂度和更接近实际情况, 选取目前 PM-PCFs 产品的典型结构尺寸, 即  $\Lambda = D = 2d$ 。PM-PCFs 由单一的纯石英制成, 可不考虑应力作用, 引起双折射变化的主要机理为热光效应和热膨胀效应, 双折射温度敏感系数可以描述为:

$$\frac{dB}{dT} = \frac{\partial B}{\partial n_s} \sigma_s + \frac{\partial B}{\partial n_a} \sigma_a + \frac{\partial B}{\partial \Lambda} \Lambda \alpha_s, \quad (1)$$

式中  $B$  为 PM-PCFs 的双折射,  $T$  为环境温度,  $n_s$  和  $n_a$  分别为二氧化硅和空气的折射率,  $\sigma_s$  和  $\sigma_a$  分别表示二氧化硅和空气的热光效应系数,  $\alpha_s = (d\Lambda/dT)$  是二氧化硅的热膨胀系数。通过仿真, 得到双折射  $B$  及双折射温度敏感系数  $dB/dT$  与  $\Lambda$  的拟合公式分别为:

$$B = (2206.02 - 1600.46\Lambda + 438.69\Lambda^2 - 53.69\Lambda^3 + 2.48\Lambda^4) \times 10^{-4}, \quad (2)$$

$$dB/dT = (-880.25\Lambda + 482.56\Lambda^2 - 88.59\Lambda^3 + 5.45\Lambda^4) \times 10^{-10}. \quad (3)$$

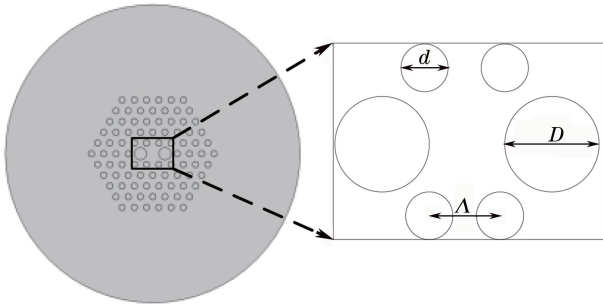


图 3 典型 PM-PCFs 的端面图

Fig. 3 Section image of a typical PM-PCFs

上述研究模型表明, 典型结构 PM-PCFs 的双折射的温度敏感系数可由  $\Lambda$  的多项式函数确定, 通过计算, 可得到  $B$  和  $dB/dT$  值随  $\Lambda$  的典型变化曲线, 如图 4 和图 5 所示。随着  $\Lambda$  的增加,  $dB/dT$  符号由负变正, 当  $\Lambda = 5.24 \mu\text{m}$  时, 双折射随温度的变化率为零。表明 PM-PCFs 结构参数设计为  $\Lambda = D = 2d = 5.24 \mu\text{m}$  时, 它的双折射可以不随温度变化, 即获得零双折射温度敏感系数。对于其他填充比, 光纤设计完成后,  $d$ 、 $D$  和  $\Lambda$  间的关系是确定的, 也能得到与 (3) 式相同的表达式, 但系数会不同, 因此都会存在一个  $\Lambda$  值, 使其双折射温度敏感系数为零。

### 2.2.1.2 双折射温度不敏感 PM-PCFs 的研制

基于以上仿真结果, 设计制作了多根不同  $\Lambda$  的

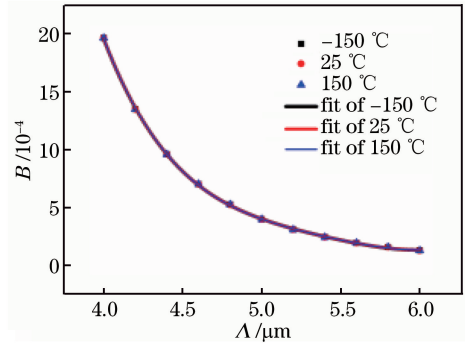


图 4 双折射随  $\Lambda$  的变化情况

Fig. 4 Dependence of birefringence on  $\Lambda$

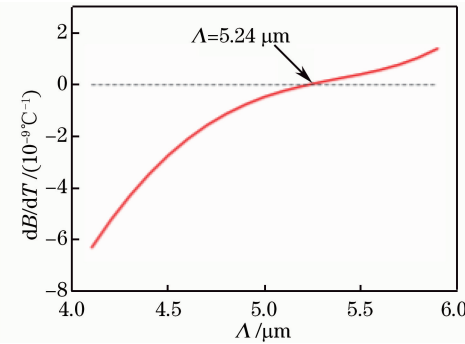


图 5 双折射温度敏感系数与  $\Lambda$  的关系

Fig. 5 Relationship between birefringence temperature sensitivity coefficient and  $\Lambda$

PM-PCFs 光纤样品。在制作预制棒时, 保证  $D = 2d = \Lambda$ , 通过调节拉纤速度, 获得了 5 根不同  $\Lambda$  的 PM-PCFs, 主要参数如表 1 所示 ( $D_c$  为包层外径,  $L_B$  为拍长), 不同  $\Lambda$  的 PM-PCFs 样品外径不同, 但导光特性基本一致。采用文献 [34] 提出的高精度 PMFs 拍长测量方法对 5 根 PM-PCFs 的双折射温度敏感系数进行测量, 结果如表 1 所示。图 6 为以实测数据为样本得到的拟合曲线, 可以看出双折射的温度敏感系数随  $\Lambda$  的增大而增大, 其符号由负变正, 在  $\Lambda$  为  $5.16 \mu\text{m}$  时, 双折射温度敏感系数为零, 测试结果与仿真结果相吻合。

表 1 PM-PCFs 样品主要参数

Table 1 Main parameters of PM-PCFs samples

Number	$\Lambda/\mu\text{m}$	$D_c/\mu\text{m}$	$L_B/\text{mm}$	$dB/dT / (10^{-9} \text{C}^{-1})$
1	4.4	105.8	3.12	-4.390
2	4.9	117.8	3.21	-1.206
3	5.0	120.2	4.40	-0.707
4	5.3	127.4	5.33	0.525
5	5.6	134.6	6.31	1.010

### 2.2.1.3 FOG 用 PM-PCFs 辐射特性研究

PCF 由纯石英制成, 没有掺杂, 理论上对核辐射敏感度低。早期的研究 [35] 表明, HCFs 的辐射敏

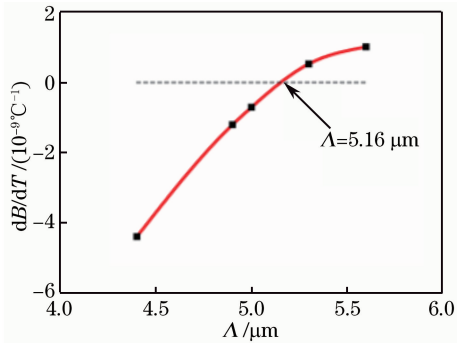


图 6 实测不同  $\Lambda$  下的双折射温度敏感系数

Fig. 6 Measured birefringence temperature sensitivity coefficient under different  $\Lambda$

感系数最小,实芯 PCFs 与纯硅芯光纤的辐射敏感系数相近,普通 PMFs 的辐射敏感系数较大。为提高 FOG 的抗辐射能力,除进行结构参数优化外,还通过挑选超纯石英材料和控制芯材料“水峰”,研制出辐射敏感系数极低的 PM-PCFs。经过大于 100 krad 总剂量辐射后,其辐射致损耗(RIA)小于 5.2 dB/km。作为对比,常规的 PMFs 的 RIA 大于 15 dB/km,未进行针对性设计的市售 PM-PCFs 的 RIA 大于 6 dB/km。

在 FOG 中,偏振非互易误差是主要的寄生干涉误差之一,与 PMFs 的双折射稳定性密切相关。为了确定辐射对 PM-PCFs 的双折射的影响,本课题组首次开展了 PMFs 双折射辐射敏感性研究,比较了常规 PMFs 和 PM-PCFs 的双折射辐射敏感性。将典型的 PM-PCFs 和 PMFs 置于辐射室内,经过总剂量 400 krad 的辐射,采用实时高精度双折射测试技术<sup>[34]</sup>,测得了 PM-PCFs 和 PMFs 的双折射的辐射敏感特性,结果如图 7 所示。PM-PCFs 和 PMFs 的双折射均随辐射剂量增加而减小,变化率分别为  $-8.69 \times 10^{-10} \text{ krad}^{-1} (\text{Si})$  和  $-4.52 \times 10^{-9} \text{ krad}^{-1} (\text{Si})$ ,PM-PCFs 的双折射辐射敏感系数

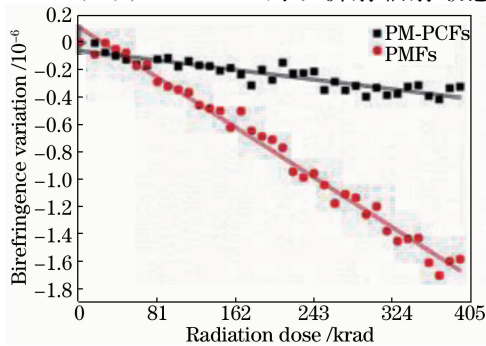


图 7 双折射变化与辐照剂量的关系

Fig. 7 Relationship between birefringence variation and radiation dose

明显小于 PMFs。由于 PM-PCFs 为形状型双折射光纤,PMFs 为应力型双折射光纤,辐射对这两种光纤的影响机理不同。对于 PM-PCFs,辐射通过改变材料的折射率影响其双折射。对于 PMFs,辐射通过改变折射率引起的双折射变化相对很小,而辐射导致的应力释放是影响其双折射的主要因素。

### 2.2.2 抗辐射 ED-PCFs 研究

掺铒光纤(EDFs)是制作 SFSs 的基本材料,其性能决定了光源的输出特性和环境适应性,由于这种光纤需要掺杂多种元素,导致其对辐射敏感。PCFs 结构设计灵活,因此能实现掺铒光纤中铒离子浓度和团簇率的单独调整,易于改变掺铒光纤的荧光特性和吸收特性,实现高浓度铒离子均匀沉积,有望大大增加抽运吸收系数和荧光效率,所以采用较短的掺铒光纤就能实现大功率宽谱荧光输出,这样设计有望减小这种光纤的辐射敏感性。基于该思路,设计制作出单模 ED-PCFs,其端面如图 8 所示。研制的 ED-PCFs 与目前普遍使用的 Fibercore 公司的 M-12 型掺铒光纤的主要参数如表 2 所示,可以看出前者的吸收率有很大提高,荧光效率高,因此在同等要求下可用较短的光纤。图 9 为 M12 型掺铒光纤和专门研制的 ED-PCFs 在辐射条件下的光谱变化,经过 100 krad(Si)辐射,ED-PCFs 的光谱变化明显小于 M-12 型掺铒光纤,因此所研制的 ED-PCFs 为获得环境稳定的 SFSs 提供了低辐射敏感的有源光纤材料。

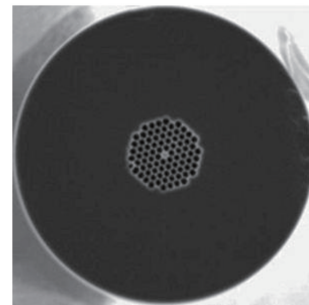


图 8 ED-PCFs 端面图

Fig. 8 Image of ED-PCFs cross section

表 2 两种掺铒光纤的主要特征参数

Table 2 Main characteristic parameters of two EDFs

Fiber model	EDFs (M-12)	ED-PCFs
Absorbility@1530 nm/(dB · m <sup>-1</sup> )	18.79	52
Absorbility @980 nm/(dB · m <sup>-1</sup> )	11.5	36
Diameter of mode field@1550 nm/ $\mu\text{m}$	6.1	6.5
Cut-off wavelength /nm	930	—

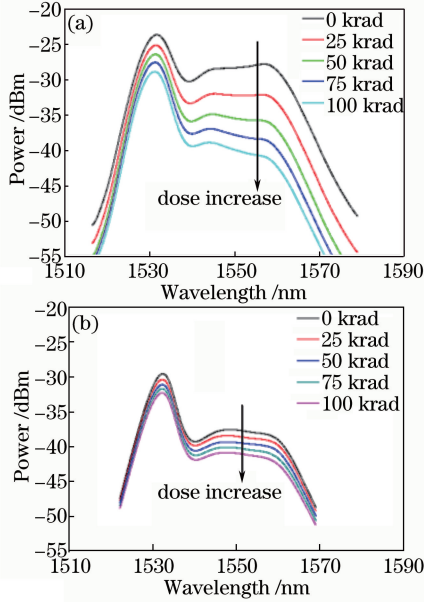


图 9 掺铒光纤辐射对比实验。(a) M-12; (b) ED-PCFs

Fig. 9 Radiation comparison experiment of EDFs. (a) M-12; (b) ED-PCFs

### 2.3 PCFs 耦合器技术

与传统光纤相比,微结构光纤具有独特的特性,在光通信、传感以及大功率光纤激光器等领域具有广泛用途。但微结构光纤的结构复杂性使其在诸如光耦合、多纤芯激励及激光合束等耦合技术领域的应用受到很大限制。目前,PCFs 耦合器的制作方法主要有抛磨法和熔锥法,但这些方法容易破坏光纤的二维光子晶体包层结构而引入大量损耗。对全固 PCFs 耦合器的制作研究表明,这两种方法的附加损耗分别不小于 3 dB<sup>[36]</sup> 和 10 dB<sup>[37]</sup>;而对于 HCFs 来说,还没有有效的耦合办法。为此,提出一种基于单个径向渐变折射率(GRIN)透镜的  $1 \times N$  光纤耦合方案。图 10 为这种耦合器的原理图(剖面图),其主体为一端制成多棱锥面的 GRIN 柱透镜(p-GRIN),从 P 点的单根单模光纤(SMF)入射的光进入 p-GRIN 时,波阵面被分为多份,为简化描述过程,只讨论两束光。

两束入射光经过 p-GRIN 将汇聚到  $P'$  和  $P''$ , 分别耦合到两根 PCFs 中。反过来,由两根 PCFs 入射的光也能合束到 P 点,耦合到 SMF 中。耦合器的主要设计方程可以表示为:

$$r_1(z) = -\frac{\tan[\varphi - \arcsin(\sin \varphi / n_1)]}{\sqrt{A}} \sin \sqrt{A} z, \quad (4)$$

$$r_2(z') = \cos \sqrt{A} z' \cdot h + r_2'(1/\sqrt{A}) \sin \sqrt{A} z', \quad (5)$$

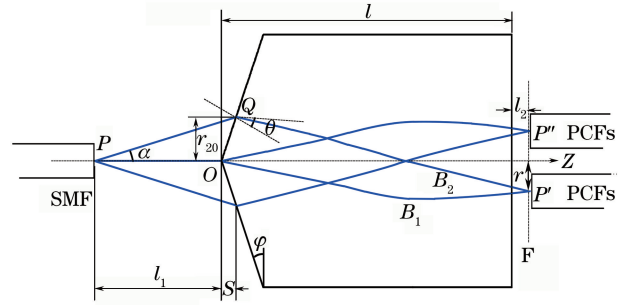


图 10  $1 \times N$  光纤耦合原理图

Fig. 10 Schematic of  $1 \times N$  fiber coupling

$$z' = z - s = z - \frac{l_1 \tan \alpha \tan \varphi}{1 - \tan \alpha \tan \varphi}, \quad (6)$$

$$r_1(z) = r_2(z') = r, \quad (7)$$

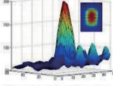
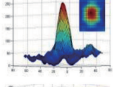
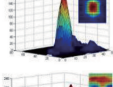
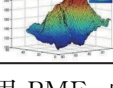
式中 A 为 GRIN 透镜的聚焦常数,  $h$  为光线追迹点到中心轴的距离,  $n_1$  为透镜的轴线折射率。基于 Matlab 软件环境编写计算程序,可实现耦合器的主要参数设计。输入参数为入射光纤端面到 GRIN 透镜顶点的距离  $l_1$ 、入射光线孔径角  $\alpha$ 、锥角  $\varphi$  和 GRIN 镜长度  $l$ , 输出参数为出射点离轴高度  $r$  和轴上位置  $l_2 = z - l$ 。

基于上述方程,通过调节  $l_1$  和锥角  $\varphi$ ,可以改变  $l_2$  和  $r$ ,进而满足不同输出状态(多光纤或多芯)的需求。所设计的 GRIN 透镜主要参数为:直径  $D = 1.8$  mm,长度  $l = 5.25$  mm,锥角  $\varphi = 6.5^\circ$ 。这种耦合器结构紧凑,容易加工和装配,避免了对光纤的直接加工,适用于各类 PCFs、多芯光纤耦合、光纤组束和光纤合光。

### 2.4 PM-PCFs 光纤熔接技术

PM-PCFs 与普通 PMFs 的熔接是 FOG 光路熔接和进行相关研究的关键技术工艺。PM-PCFs 的结构和导光机理不同于传统光纤,在熔接方式和参数上也存在很大的区别<sup>[26, 38]</sup>。为保证 PM-PCFs 与 PMFs 的熔接质量,要重点解决两个问题,即保证模式匹配以获得低损耗、保证偏振应力轴和偏振几何轴对准以获得低偏振串音。PMFs 的模斑基本为圆形,椭圆度很小,但 PM-PCFs 为几何型 PMFs,模场较小且模斑为椭圆形,而且椭圆度较大,直接熔接损耗很大。为了减小由于模场不匹配引入的损耗,人们提出并实现了一种电弧放电预处理技术,通过在 PCFs 端面进行预放电处理,不但能将 PM-PCFs 模场扩大到合适的大小,而且减小了模斑的椭圆度。表 3 所列作为一种 PM-PCFs 经预放电处理后,模斑的典型演变情况,在预处理电流为 10 ~ 11 mA 区间,可以得到较好的效果。

表 3 实测传输模场 3D 图和参数  
Table 3 3D images and parameters of measured transmission mode field

Current /mA	Intensity distribution	Length of long axis / $\mu\text{m}$	Length of short axis / $\mu\text{m}$	Ellipticity
0.00		4.72	2.55	1.85
10.0		5.17	2.95	1.75
11.0		5.58	3.22	1.73
12.0		—	—	—

常用 PMFs 的偏振应力轴可通过侧面成像或观测技术确定<sup>[39-40]</sup>,但这些技术用在 PM-PCFs 上很难获得好的定轴精度,因此端面成像对轴技术成为首选技术,图 11 为熊猫型 PMFs 和 PM-PCFs 在藤仓公司 PM-100+ 上获得的端面图像。基于端面图像可以实现较高精度的偏振轴对准。通过实验可以发现,两种不同 PMFs 的慢轴正交对准,可以获得更优的偏振串音和更低的损耗,图 11 所示即为两种光纤的慢轴正交对准后的光纤端面图,熔接点的偏振串音优于 -30 dB。综合应用预熔技术和端面对轴技术,PMFs 与 PM-PCFs 的熔接损耗可以小于 0.7 dB,图 12 为典型的熔接损耗与熔接放电电流的关系曲线,在熔接电流为 10 mA 附近,可实现低损耗熔接。

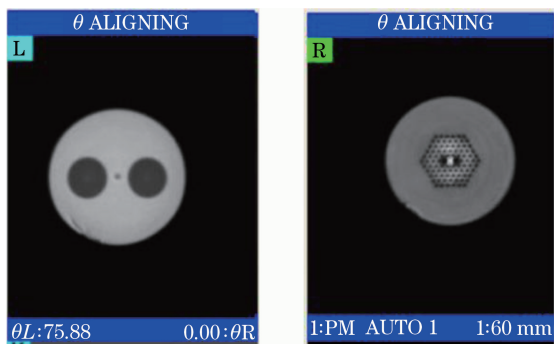


图 11 熔接机中 PMFs 和 PM-PCFs 的端面和侧视图  
Fig. 11 Ending and side view of PMFs and PM-PCFs in welding machine

### 3 PCFOG 原型样机研究和实验

#### 3.1 PCFOG 原型样机方案和基本性能

为了验证 PCFOG 的性能和环境适应性,设计并制作了闭环 PCFOG,其方案如图 13(a)所示,为

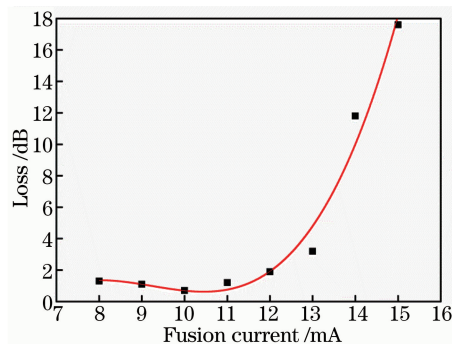


图 12 熔接损耗与熔接电流的关系

Fig. 12 Relationship between fusion loss and fusion current  
典型功能分离结构。多功能集成光学调制器 (MIOC)和 PCFs 环组成敏感环路模块 (SIA),集成在有磁屏蔽的结构中;SFSs、探测器、耦合器和数字检测系统组成电光模块 (EOA),两模块空间分离,调制信号通过光电混合缆连接到 MIOC。SFSs 采用 ED-PCFs 作为有源光纤,输出功率约为 15.2 mW,平均谱宽约为 42.5 nm,平均波长约为 1545.52 nm。光纤环用专门研制的 PM-PCFs 采用 4 级对称技术绕成,所用 PM-PCFs 长度约 1000 m,光纤环直径约 120 mm。信号检测电路为全数字闭环方案。图 13(b)为研制的三轴 PCFOG 原型样机照片。

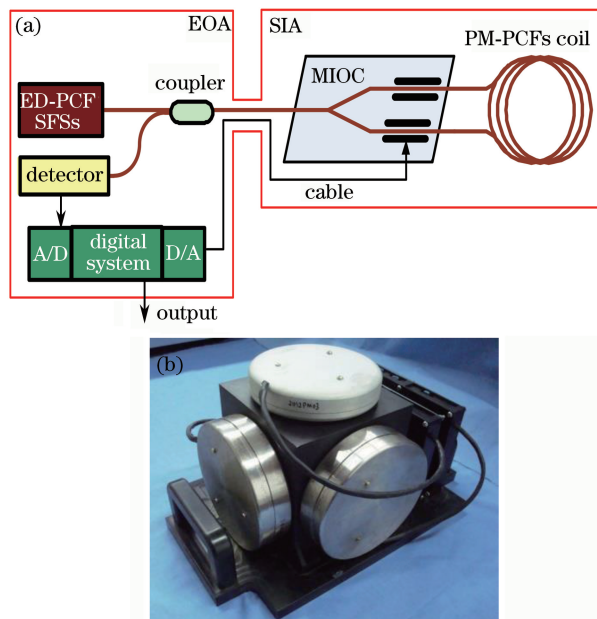


图 13 (a) PCFOG 原型样机的结构方案;  
(b)三轴 PCFOG 原型样机照片

Fig. 13 (a) Configuration of PCFOG prototype;  
(b) photograph of three-axis PCFOG prototype

在实验室条件下,PCFOG 原型样机的零偏稳定性达到  $0.0068^\circ/\text{h}$  ( $1\sigma$ , 100 s),标度误差为

1.53 ppm。典型的静态测试曲线、Allan 方差曲线和标度测量曲线如图 14 所示。

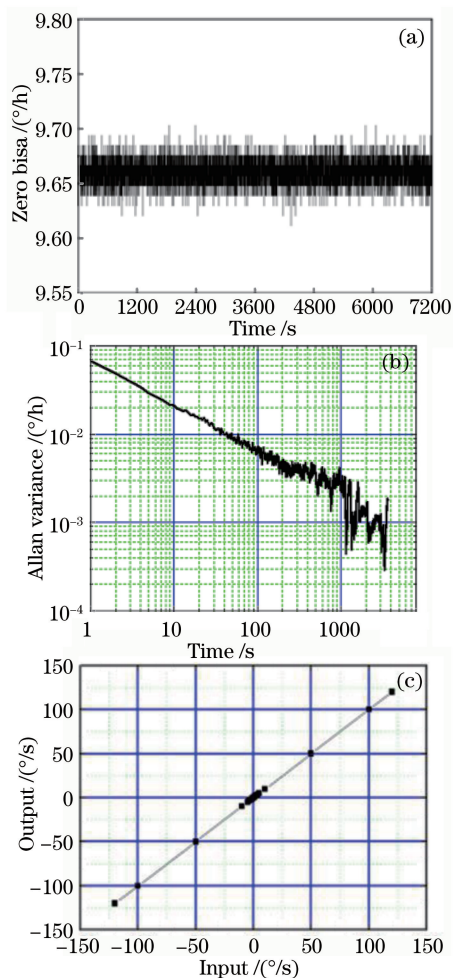


图 14 PCFOG 典型性能曲线。

(a) 静态测试; (b) Allan 方差; (c) 标度

Fig. 14 Typical performance curve of PCFOG.

(a) Static testing; (b) Allan variance; (c) scale factor

### 3.2 PCFOG 原型样机典型环境测试

温度和辐射影响是 FOG 现场应用,特别是空间应用必须考核的主要指标。为此,对研制的原型样机进行典型环境的温度稳定性和辐射稳定性实验。

#### 3.2.1 温度稳定性

温度稳定性实验在带温箱(型号为 SET-Z-021UF)的转台上进行。在进行零偏稳定性实验时,温度实验范围为  $-40 \sim +60$   $^{\circ}\text{C}$ ,温变速率为  $0.5$   $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,信号采集时间间隔为  $1$  s,记录整个过程的数据。对原始数据按照相关标准进行计算,全过程零位漂移接近  $0.01^{\circ}/\text{h}(1\sigma, 100$  s)。在进行全温标度稳定性实验时,在上述温度范围内,以间隔  $20$   $^{\circ}\text{C}$ 取实验温度点进行测试,全温标度误差可达到

$3 \times 10^{-5}$ 。实验结果表明,研制的 PCFOG 原型样机具备良好的温度稳定性。

#### 3.2.2 辐射稳定性

利用一台分立的 PCFOG 样机进行辐射稳定性实验,实验地点为北京师范大学钴源实验室。由于陀螺检测电路抗辐射能力较差,因此在实验时用铅砖屏蔽了电路部分,实验现场如图 15 所示。实验过程中,辐射总剂量大于  $100$  krad(Si),辐射剂量率约  $0.08$  rad(Si)/s。实时记录陀螺输出,计算整个辐射实验过程中零偏和零漂,样机零偏和零漂变化均小于  $0.03^{\circ}/\text{h}(1\sigma, 100$  s)。实验结果表明,PCFOG 也具备良好的辐射稳定性。

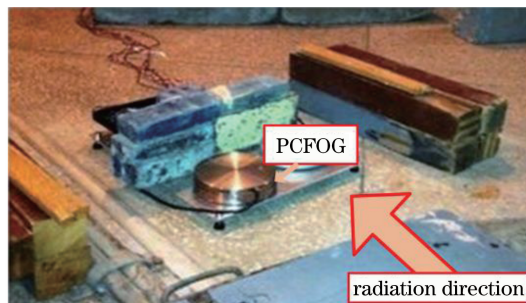


图 15 辐射实验现场照片

Fig. 15 Photograph of radiation experiment scene

## 4 结 论

为满足空间和其他高精度导航控制系统的迫切需求,提出基于实芯 PM-PCFs 和 ED-PCFs 的 FOG 方案。研制出专用的 PCFs 和 ED-PCFs 等光纤材料,在光纤材料温度稳定性、抗辐射、耦合和熔接等关键方面取得突破,获得高性能光纤材料和技术工艺,研制出 PCFOG 原型样机,并通过了典型环境实验。研究结果表明,PCFOG 在精度和环境适应性等方面都具备明显优势,已具备工程应用条件。

### 参 考 文 献

- [1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope: challenges to become the ultimate rotation-sensing technology [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 828-832.
- [2] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[C]. SPIE, 2016, 9852: 985207.
- [3] Lefevre H C. Potpourri of comments about the fiber optic gyro for its 40<sup>th</sup> anniversary, and how fascinating it was and it still is! [C]. SPIE, 2016, 9852: 985203.
- [4] Yang Y H, Yang F L. High performance fiber optic

- gyroscope with a radiation-tolerant and temperature-stable scale factor[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(11): 110605.
- [5] Wu Y J. The current situation and countermeasures of high precision fiber optic gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2015, 2(4): 53-57.  
吴衍记. 高精度光纤陀螺发展现状及对策[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(4): 53-57.
- [6] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [7] Knight J C, Birks T A, Russell P S, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [8] Knight J C, Broeng J, Birks T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. Science, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [9] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [10] Chen X, Li M J, Venkataraman N, *et al.* Highly birefringent hollow-core photonic bandgap fiber[J]. Optics Express, 2004, 12(16): 3888-3893.
- [11] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2003, 299(5605): 358-362.
- [12] Fogs F. Hollow core fibers for fiber optic gyroscopes [R]. Denmark: NKT Photonics White Paper, 2009.
- [13] Kim H K, Dangui V, Digonnet M, *et al.* Fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber [C]. SPIE, 2005, 5855: 198-201.
- [14] Kim H K, Digonnet M J F, Kino G S. Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(8): 3169-3174.
- [15] Tawney J, Hakimi F, Willig R L, *et al.* Photonic crystal fiber IFOGs[C]. Cancun: Optical Fiber Sensors, 2006: ME8.
- [16] Digonnet M, Blin S, Kim H K, *et al.* Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(10): 3089-3097.
- [17] Blin S, Kim H K, Digonnet M J F, *et al.* Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 861-865.
- [18] Sanders G A, Strandjord L K, Qiu T. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing[C]. Cancun: Optical Fiber Sensors, 2006: ME6.
- [19] Terrel M A, Digonnet M J, Fan S H. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(7): 931-937.
- [20] Benser E, Sanders G, Smickilas M, *et al.* Development and evaluation of a navigation grade resonator fiber optic gyroscope [C]. Karlsruhe: Inertial Sensors and Systems, 2015: P04.
- [21] Feng L S, Deng X W, Ren X Y, *et al.* Research on hollow core photonic bandgap fiber ring resonator based on micro-optics structure[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806002.  
冯丽爽, 邓学文, 任小元, 等. 基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0806002.
- [22] Yan Y C, Ma H L, Wang L L, *et al.* Effect of Fresnel reflections in a hybrid air-core photonic-bandgap fiber ring-resonator gyro[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31384-31392.
- [23] Yang Y H, Ye M, Duan W Q, *et al.* Polarization maintaining photonic crystal fiber IFOG [C]. SPIE, 2012, 8421: 84210D.
- [24] Lu L, Yang Y H, Li H Y. Study of polarization-maintaining photonic crystal fibers with zero birefringent temperature sensitive coefficient[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006006.  
陆林, 杨远洪, 李红颖. 零双折射温度敏感系数保偏光子晶体光纤研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006006.
- [25] Yang Y H, Li H Y, Song K Y, *et al.*  $1 \times N$  fiber optic coupler based on a polyhedral gradient-index lens[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2685-2689.
- [26] Ye M, Yang Y H, Duan W Q, *et al.* Measure and redress of mode field diameter of polarization maintaining photonic crystal fibers[C]. London: IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology, 2012.
- [27] Wang W, Li J. Research on photonic crystal fiber optic gyroscope[J]. Science China: Information Sciences, 2015, 45(7): 869-877.  
王巍, 李晶. 光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(7): 869-877.
- [28] Li J, Wang W, Wang X F, *et al.* Scale factor of photonic crystal fiber-optic gyroscope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4082-4087.  
李晶, 王巍, 王学锋, 等. 光子晶体光纤陀螺标度因数特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4082-4087.
- [29] Yang H R. Mechanism and suppression of temperature effect of photonic crystal fiber optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.  
杨汉瑞. 光子晶体光纤陀螺温度效应的机理与抑制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [30] Wang L. Study of polarization maintaining photonic



- crystal fiber and its application on fiber optic gyroscope[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- 王琳. 偏振保持光子晶体光纤及其在光纤陀螺中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [31] Wu X, Ruan S C, Liu C X, *et al.* Experimental investigation on superfluorescent sources based on erbium-doped photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306005.
- 吴旭, 阮双琛, 刘承香, 等. 基于掺铒光子晶体光纤超荧光光源的实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306005.
- [32] Chen W. Fabrication of the rare-earth-ions doped photonic crystal fibers and study on their characteristics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 陈伟. 掺稀土光子晶体光纤制备及其特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [33] Wu X, Ruan S C, Liu C X, *et al.* High-stable and broadband erbium-doped superfluorescent photonic crystal fiber source[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 095005.
- [34] Yang Y H, Duan W Q, Ye M. High precision measurement technology for beat length of birefringence optical fiber[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 24(2): 025201.
- [35] Yang Y H, Duan W Q, Ye M, *et al.* Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1143-1147.
- 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.
- [36] Kim H, Kim J, Paek U C, *et al.* Tunable photonic crystal fiber coupler based on a side-polishing technique[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(11): 1194-1196.
- [37] Lee B H, Eom J B, Kim J, *et al.* Photonic crystal fiber coupler[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(10): 812-814.
- [38] Li H Y, Yang Y H, Yang W. Mode field measurement and discharge-redress techniques for polarization-maintaining photonic crystal fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0206001.
- 李红颖, 杨远洪, 杨巍. 保偏光子晶体光纤模场测量与放电调整技术 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0206001.
- [39] Zheng W X. Automated fusion-splicing of polarization maintaining fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 15(1): 125-134.
- [40] Yamada T, Ohsato Y, Yoshinuma M, *et al.* Arc fusion splicer with profile alignment system for high-strength low-loss optical submarine cable[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, 4(8): 1204-1210.