

光子晶体光纤陀螺技术

张春熹*, 张祖琛, 高福宇

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 介绍了北京航空航天大学在光子晶体光纤陀螺技术方面的研究进展。在光纤研制方面,设计并拉制了适用于 1550 nm 高精度光纤陀螺的 $\Phi 110 \mu\text{m}$ 细径实芯保偏光子晶体光纤和适用于 850 nm 小型化光纤陀螺的 $\Phi 100 \mu\text{m}$ 超细径实芯保偏光子晶体光纤,突破了 km 级空芯光子晶体光纤的批量制备技术。在陀螺应用方面,干涉式实芯光子晶体光纤陀螺精度突破 $0.001 (^{\circ})/\text{h}$,实现了国际上光子晶体光纤陀螺的首次空间试验验证;干涉式空芯光子晶体光纤陀螺实现了优于 $0.4 (^{\circ})/\text{h}$ 的样机精度;同时还探索了空芯光子晶体光纤在谐振式光纤陀螺上的应用。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 光子晶体光纤; 干涉式光子晶体光纤陀螺; 谐振式光子晶体光纤陀螺

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1706002

Photonic Crystal Fiber Optic Gyroscope

Zhang Chunxi*, Zhang Zuchen, Gao Fuyu

School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract In this paper, the research progress of photonic crystal fiber optic gyroscope (PCFOG) is introduced based on the work carried out by Beihang University. In terms of optical fiber development, photonic crystal fibers (PCFs) with a diameter of $\Phi 110 \mu\text{m}$ for 1550 nm high precision fiber optic gyroscope (FOG) and superfine solid core polarization-maintaining PCFs with diameter of $\Phi 100 \mu\text{m}$ for 850 nm miniaturized FOG have been designed and fabricated. The batch preparation technology of km-level hollow core photonic crystal fibers has been broken through. In terms of gyroscope applications, the accuracy of the interferometric fiber optic gyroscope with solid-core photonic crystal fibers has reached $0.001 (^{\circ})/\text{h}$, and the application in spacecraft has realized for the first time worldwide to our knowledge. The hollow-core interferometric PCFOG prototype with the prototype accuracy of $0.4 (^{\circ})/\text{h}$ has been fulfilled. Meanwhile, the application of hollow-core PCF in resonant fiber optic gyroscope has also been investigated.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; photonic crystal fiber; interferometric photonic crystal fiber optic gyroscope; resonant photonic crystal fiber optic gyroscope

1 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的一种主流角速度传感器,是实现载体自主导航和定位定姿的基础核心器件,目前已广泛应用于海、陆、空、天等各类领域^[1]。光纤是光纤陀螺光路信号的核心传输介质,其光学特性会直接影响到光纤陀螺的性能。传统光纤受其全反射传光原理的约束,材料不单一,光学特性易受外界温度、磁场和辐照等环境因素的影响,从而导致传统光纤陀螺在复杂环境下的性能劣化。例如:未加防护的光纤陀螺在卫星上使用,宇宙射线和高能粒子会引起光纤损耗变大,继而导致光纤陀螺精度降低甚至无法使用。为解决光纤陀螺的环境适应性问题,一般采用

被动防护的措施,即通过外加恒温控制装置,增加外罩厚度,选用铅、钨等重金属材料或抗磁材料等来隔离温度、磁场和辐射对陀螺的作用。这些措施虽然能够在一定程度上抑制环境对陀螺性能的影响,但并没有从根本上解决问题,同时还会带来体积、重量、功耗和成本增加等一系列副作用。光子晶体光纤的出现为从根本上解决光纤陀螺的环境适应性问题提供了技术途径。

光子晶体光纤的概念最早由 Philip Russell 于 1991 年提出,但直到 1999 年 Knight 课题组^[2]才成功拉制出世界上第一根光子晶体光纤。光子晶体光纤是基于低折射率材料(空气)在高折射率背景材料(石英玻璃)中的二维周期性排列而形成的一种微结构光纤,分为实

芯光子晶体光纤和空芯光子晶体光纤。实芯光子晶体光纤是利用石英玻璃和空气孔构成的包层折射率小于石英玻璃纤芯折射率的特征,通过全内反射原理将光波束缚在纯石英纤芯中传播;空芯光子晶体光纤是通过将石英玻璃和空气孔周期性排列构成光子晶体,利用光子带隙效应控制光波在中心缺陷(空气纤芯)中传播。光子晶体光纤具有与传统光纤完全不同的空气孔微结构和导波机理,对温度、磁场和辐照等环境因素的敏感性较传统光纤要小得多^[3-5],因此,光子晶体光纤是解决光纤陀螺环境适应性问题的理想选择,光子晶体光纤陀螺是光纤陀螺的发展趋势。

自 2006 年起,北京航空航天大学开展了多项光子晶体光纤陀螺技术研究,经过十余年的攻关,目前已经形成了比较完备的光子晶体光纤仿真设计体系和光子晶体光纤制备平台,并在此基础上完成了光子晶体光纤陀螺的样机研制与试验验证。本文主要介绍了北京航空航天大学在光子晶体光纤陀螺技术方面的研究进展,包括陀螺用光子晶体光纤的设计与制备,以及光子晶体光纤在干涉式和谐振式光纤陀螺上的应用探索情况。

2 光子晶体光纤

光子晶体光纤作为新型微结构光纤,通过周期性的空气孔结构形成光子晶体,利用所产生的光子带隙效应将光纤限制在纤芯中传输,不同于传统光纤的全反射原理,光在光子晶体光纤中传输不再完全受材料限制,光可在空气甚至真空中传输,这为提高光纤陀螺的环境稳定性提供了新途径。

2.1 实芯光子晶体光纤

鉴于光子晶体光纤所具备的稳定性优势,北京航空航天大学于 2006 年开始了陀螺用低损耗光子晶体光纤研究,提出了陀螺用的 4 层周期结构细径实芯保偏光子晶体光纤方案,光纤包层直径为 80 μm ,涂覆直径为 110 μm (即 $\Phi 80 \mu\text{m} / 110 \mu\text{m}$),在较细的光纤直径约束下设计了力学强度和光学特性均满足要求的结构,如图 1(a)所示。在 1550 nm 传输波段,光纤的最低损耗小于 1.2 dB/km,偏振串音约为 20 dB@1 km,满足高精度光纤陀螺需求。

随着陀螺对高精度、超稳定、小型化的需求日益迫切,要求光纤进一步细径化,传输波长到达 850 nm 波段。原 4 层结构光纤难以满足新一代光纤陀螺需求,因此提出了双层孔结构的准单偏振细径实芯保偏光子晶体光纤,实现的光纤包层直径为 60 μm ,涂覆直径为 100 μm (即 $\Phi 60 \mu\text{m} / 100 \mu\text{m}$),如图 1(b)所示。相对 4 层孔实芯光子晶体光纤,双层孔光纤空气孔数量减少了 68%,结构复杂度及制备工艺难度大幅降低。经过数轮工艺改进,目前在传输波长 850 nm 处,光纤损耗降低至 <7 dB/km,偏振串音约为 15 dB@100 m,适用于轻小型光纤陀螺。

2.2 空芯光子晶体光纤

空芯光子晶体光纤通过薄壁多孔的“蜂窝”状包层

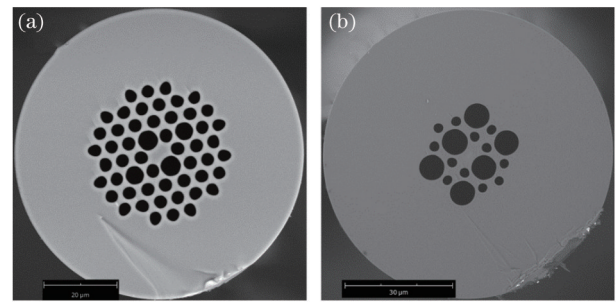


图 1 细径保偏实芯光子晶体光纤。(a) 1550 nm 波段 $\Phi 80 \mu\text{m} / 110 \mu\text{m}$ 光纤;(b) 850 nm 波段 $\Phi 60 \mu\text{m} / 100 \mu\text{m}$ 光纤

Fig. 1 Thin-diameter polarization-maintaining solid-core photonic crystal fiber. (a) $\Phi 80 \mu\text{m} / 110 \mu\text{m}$ fiber in 1550 nm band; (b) $\Phi 60 \mu\text{m} / 100 \mu\text{m}$ fiber in 850 nm band

形成二维光子晶体,是真正意义的光子晶体光纤。但空芯光子晶体光纤中存在大量空气孔,相较于实芯光子晶体光纤,其拉制过程中需要控制的参数更多,拉制工艺更为复杂。空芯光子晶体光纤中光在空气纤芯中的传输具有良好的环境稳定性。Stanford 大学研究人员于 2005 年搭建了首个干涉式空芯光子晶体光纤陀螺样机^[6],研究结果表明,由 Kerr 效应引入的光纤陀螺漂移是传统陀螺的 1/170^[7],同等光纤长度条件下的 Shupe 误差是传统陀螺的 1/6.5^[8],Verdet 常数为传统光纤的 1/20^[9]。通过试验及理论分析验证了光子晶体光纤陀螺的环境稳定性优势。

北京航空航天大学针对陀螺用光子带隙光纤开展了理论设计与制备技术研究。空芯光子晶体光纤拉制过程中需要精确的气压分区控制,以实现空气孔均匀、稳定成型。设计并研制了三通道光子晶体光纤制备用气压控制设备,如图 2 所示,控制气压范围为 20~140 kPa,控制精度优于 100 Pa,结合“堆积-拉制”法完成了空芯光子晶体光纤自主研制。



图 2 光子晶体光纤气压控制设备

Fig. 2 Pressure control equipment for photonic crystal fiber

空芯光子晶体光纤应用于光纤陀螺需要满足低损耗、km 级光纤高均匀性的基本特征。空芯光子晶体光纤的损耗主要来源于纤芯内壁粗糙及结构不均匀引起的散射损耗。为提高制备过程中的结构均匀性,建立了多参数融合的光纤拉丝数学模型,实现了光纤微孔结构差异约为 1.5%@2.5 km 的高均匀空芯光子晶体光纤拉制^[10]。针对粗糙引起的散射损耗,采用了纤芯

结构改型以及增大纤芯的方式对其进行抑制。图 3 (a)所示为纤芯圆角改进的 7 芯空芯光子晶体光纤,通过纤芯表面模耦合抑制实现了损耗小于 20 dB/km 的小芯径光纤。图 3(b)所示为 19 芯空芯光子晶体光纤,采用增大纤芯直径的方式降低光纤损耗也是目前主流的空芯光子晶体光纤降损方法,该方法实现了损耗约为 10 dB/km 的空芯光子晶体光纤。

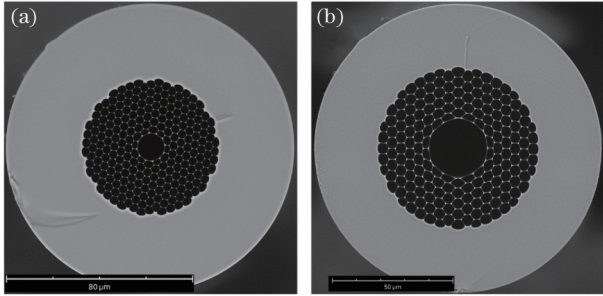


图 3 空芯光子晶体光纤。(a) 7 芯空芯光子晶体光纤; (b) 19 芯空芯光子晶体光纤

Fig. 3 Hollow core photonic crystal fibers. (a) 7-core hollow core photonic crystal fiber; (b) 19-core hollow core photonic crystal fiber

经过多轮的结构及工艺优化,空芯光子晶体光纤性能逐渐提高,已实现长度为数 km 级的陀螺用空芯光子晶体光纤的批量制备。但目前空芯光子晶体光纤的损耗仍然较大,并且难以同时兼顾高保偏能力,针对高精度光纤陀螺的应用尚需进行降损与保偏技术研究。

3 光子晶体光纤陀螺

光纤陀螺按工作方式可分为干涉式光纤陀螺和谐振式光纤陀螺两类^[1]。干涉式光纤陀螺利用的是双光

束干涉,通过检测两束相向传播光波的相位差来提高对角速度的敏感度,其检测灵敏度与光纤环长度直接相关,高精度光纤陀螺的光纤环长度一般在 1 km 以上;谐振式光纤陀螺利用多光束干涉,通过构造光纤谐振腔、检测谐振频差,进而提高对角速度的敏感度,其检测灵敏度与光纤谐振腔的精细度直接相关,所用光纤长度通常为几米到几十米,与干涉式光纤陀螺相比具有易于小型化的优点。然而,受激光器频率噪声和光纤谐振腔偏振噪声等限制,目前谐振式光纤陀螺的精度相对较低,且其通常具有复杂的激光稳频及调制解调电路,体积庞大,其实用化和小型化还未实现^[11]。因此,干涉式光纤陀螺是目前得到规模应用的光纤陀螺主流方案,其精度范围覆盖 0.00001~10 (°)/h,而谐振式光纤陀螺仍以实验室探索为主。

光子晶体光纤陀螺与传统光纤陀螺一样可以分为干涉式和谐振式两种类型。实芯光子晶体光纤在传输损耗和保偏能力上与传统光纤相当,空芯光子晶体光纤在环境适应性上更具优势,因此,需要长距离光纤环来保证精度的干涉式光子晶体光纤陀螺以实芯光子晶体光纤为主,谐振式光子晶体光纤陀螺则更多基于空芯光子晶体光纤谐振腔。

3.1 干涉式光子晶体光纤陀螺

干涉式光子晶体光纤陀螺的基本结构如图 4 所示,其核心敏感部件光纤环采用保偏光子晶体光纤绕制而成,其余光学器件与传统光纤陀螺一致。光纤环与集成光学调制器的连接一般通过尾纤熔接来实现,如图 5 所示,但光子晶体光纤具有特殊的微孔结构,受热时极易发生变形甚至塌陷,光子晶体光纤环与集成光学调制器传统光纤尾纤的熔点存在损耗大、强度低、可靠性差等问题。光子晶体光纤直接耦合技术为解决这一问题提供了技术途径。

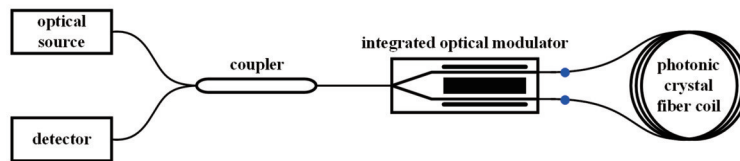


图 4 干涉式光子晶体光纤陀螺基本结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of interferometric photonic crystal fiber optic gyroscope.

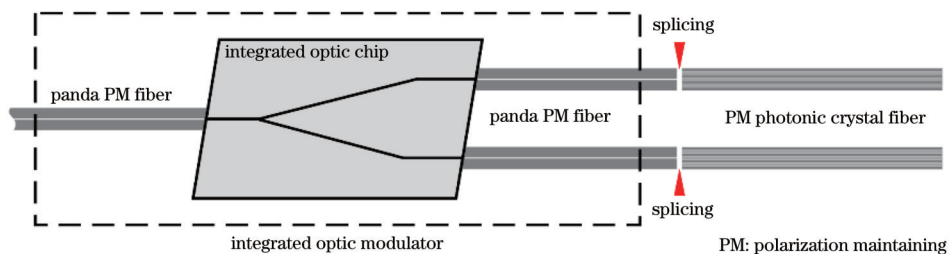


图 5 光子晶体光纤环与集成光学调制器熔接示意图

Fig. 5 Splicing between photonic crystal fiber coil and integrated optical modulator

直接耦合技术是指光子晶体光纤尾纤直接与集成光学调制器芯片耦合,如图 6 所示。在国家重大科

学仪器设备开发专项的支持下,开展了光子晶体光纤直接耦合装备技术研究,突破了光纤端面三维形貌高

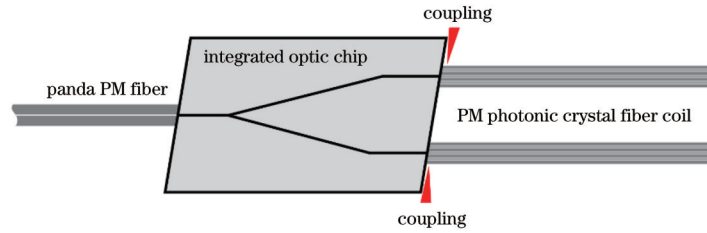


图 6 光子晶体光纤环与集成光学芯片直接耦合示意图

Fig. 6 Coupling between photonic crystal fiber coil and integrated optical chip

分辨率测量等关键技术^[12],研制了相应的直接耦合设备(图 7),实现了光子晶体光纤环与集成光学调制器

芯片的低损耗、高可靠直接耦合,这为光子晶体光纤陀螺技术的应用实现提供了技术与设备基础。



图 7 光纤环与集成光学芯片直接耦合系统

Fig. 7 Direct coupling system between fiber coil and integrated optical chip

基于光子晶体光纤及相关集成工艺与装备技术的突破,成功研制了首只 $0.001(^{\circ})/h$ 高精度干涉式实芯光子晶体光纤陀螺工程样机(图 8),并于 2017 年 4 月 20 日在“天舟一号”货运飞船上首飞成功,在轨运行 150 d 性能稳定,这是国际上光子晶体光纤陀螺的首次空间试验,推动了我国光纤陀螺空间应用的发展。

念和可行性,研究进展基本与国外保持同步,目前已实现精度优于 $0.4(^{\circ})/h$ 的干涉式空芯光子晶体光纤陀螺样机,如图 9 所示,并计划开展空间搭载试验验证。

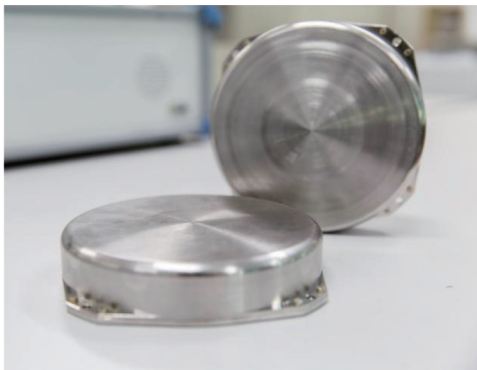


图 8 高精度干涉式实芯光子晶体光纤陀螺

Fig. 8 Interferometric solid-core photonic crystal fiber optic gyroscope with high precision

目前干涉式实芯光子晶体光纤陀螺精度已突破 $0.001(^{\circ})/h$,2019 年 12 月成功应用于“实践二十号”试验卫星飞行试验,2020 年 12 月成为“新技术验证七号”卫星姿控系统主控器件,陀螺总体技术指标达到国际领先水平。

在空芯光子晶体光纤的应用研究方面,搭建了基于空芯光子晶体光纤环的干涉式空芯光子晶体光纤陀螺原理样机,验证了空芯光子晶体光纤陀螺的技术概

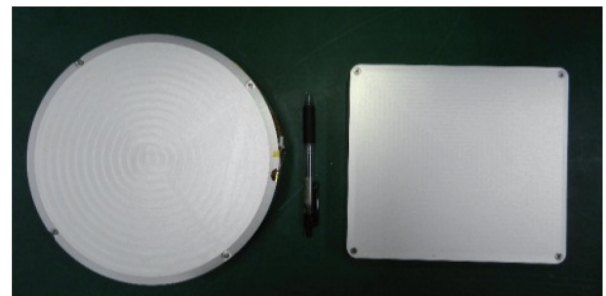


图 9 干涉式空芯光子晶体光纤陀螺样机

Fig. 9 Interferometric hollow-core photonic crystal fiber optic gyroscope prototype

3.2 谐振式光子晶体光纤陀螺

与环形激光陀螺和干涉式光纤陀螺相比,谐振式光纤陀螺集成了二者的优点,即以光纤环腔作为谐振腔,无需激光陀螺气密谐振腔的超精密加工,也不需要干涉式光纤陀螺动辄成百上千米的光纤环长,在高精度和小型化方面具有潜在的优势,是光学陀螺发展的重要方向。传统谐振式光纤陀螺采用普通保偏光纤作为导光介质,光波在玻璃材料中传播,其导波特性和外界温度、磁场的环境因素发生变化时也会发生变化,在陀螺系统中引入偏振误差、背向反射/散射误差等,严重影响陀螺精度^[13]。

光子晶体光纤技术的发展,特别是空芯光子晶体光纤的出现,为谐振式光纤陀螺的发展带来了全新机遇。空芯光子晶体光纤利用光子带隙效应将光限制在

空气中传输,对弯曲、辐照、温度、磁场等的敏感度低,在噪声抑制上具有原理性优势。然而,也正是因为空芯光子晶体光纤的特殊结构,其谐振腔光波出入口的耦合方式复杂,直接影响到谐振腔精细度和尺寸^[14]。因此,在开展空芯光子晶体光纤研制的同时,针对高质量谐振腔及其耦合方案开展了相关研究,提出了基于

单光束分束器的空芯光子晶体光纤谐振腔方案^[15],如图 10 所示,通过一对透镜和一个滤光器组成的微光耦合器实现了精细度为 12 的谐振腔,并在此基础上搭建了陀螺样机,通过偏振相关相位调制抑制偏振噪声,样机零偏稳定性达到 $1.3 (^{\circ})/h$ ^[16]。

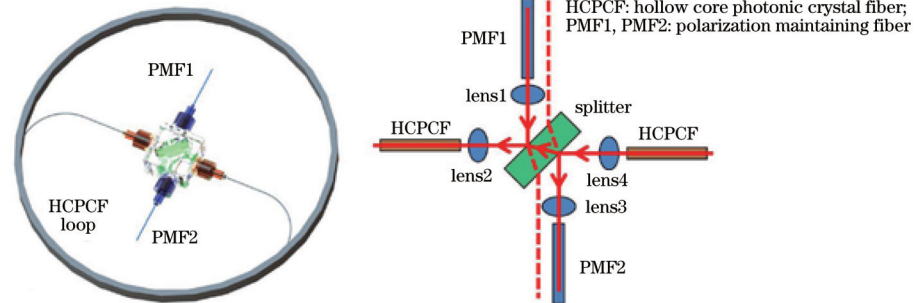


图 10 基于单光束分束器的空芯光子晶体光纤环形谐振腔示意图

Fig. 10 Hollow-core photonic crystal fiber ring resonator based on single optical beam splitter

4 结 论

光子晶体光纤是基于二维周期结构的新型微结构光纤,对温度、磁场和辐照等外界环境的敏感度低,是解决光纤陀螺环境适应性的理想选择。目前实芯光子晶体光纤的性能与传统光纤相当,干涉式实芯光子晶体光纤陀螺的精度突破 $0.001 (^{\circ})/h$,已作为主控器件应用于卫星等空间飞行器;空芯光子晶体光纤实现了 km 级批量制备,完成了空芯光子晶体光纤陀螺样机研制与技术验证,但光纤的传输损耗、偏振串音等性能指标还不能完全满足陀螺应用需求,空芯谐振式光子晶体光纤陀螺还处于原理验证与原型样机研究阶段。

在当前研究基础上,需继续开展高精度干涉式实芯光子晶体光纤陀螺和微小型谐振式空芯光子晶体光纤陀螺两个方向的关键技术攻关和工程化应用探索,充分发挥光子晶体光纤在环境适应性上的原理性优势,实现我国光纤陀螺的跨越式发展。

参 考 文 献

- [1] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. 2nd ed. New York: Artech House, 2014.
- [2] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [3] Knight J. Photonic crystal and microstructured fibers: making fibers better by leaving bits out[C]//2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010.
- [4] Girard S, Baggio J, Leray J L. Radiation-induced effects in a new class of optical waveguides: the air-guiding photonic crystal fibers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 52(6): 2683-2688.
- [5] Digonnet M J F, Kim H K, Kino G S, et al. Understanding air-core photonic-bandgap fibers: analogy to conventional fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(12): 4169-4177.
- [6] Kim H K, Dangui V, Digonnet M, et al. Fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 198-201.
- [7] Dangui V, Kim H K, Digonnet M J F, et al. Phase sensitivity to temperature of the fundamental mode in air-guiding photonic-bandgap fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(18): 6669-6684.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 徐小斌, 王晓阳, 高福宇, 等. 光子晶体光纤陀螺技术及其首次空间试验[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 1-7.
- [11] Xu X B, Wang X Y, Gao F Y, et al. Photonic crystal fiber-optic gyroscope technology and its first space experiment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(1): 1-7.
- [12] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9852: 985207.
- [13] Zhang C X, Li H W, Song N F, et al. High-stability algorithm in white-light phase-shifting interferometry for disturbance suppression[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 6900718.
- [14] 冯雨爽, 焦洪臣, 李慧, 等. 空芯光子晶体光纤谐振式光学陀螺技术[C]//2016年光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会. 北京: 中国惯性技术学会, 2016.
- [15] Feng L S, Jiao H C, Li H, et al. Hollow-core photonic

crystal fiber resonant optical gyro[C]//2016 Seminar on Optical Gyroscope and System Technology Development and Application. Beijing: Chinese Society of Inertial Technology, 2016.

- [14] Sanders G A, Taranta A A, Narayanan C, et al. Hollow-core resonator fiber optic gyroscope using nodeless anti-resonant fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(1): 46-49.
- [15] Jiao H C, Feng L S, Wang J J, et al. Transmissive

single-beam-splitter resonator optic gyro based on a hollow-core photonic-crystal fiber[J]. Optics Letters, 2017, 42(15): 3016-3019.

- [16] Jiao H C, Feng L S, Wang K, et al. Analysis of polarization noise in transmissive single-beam-splitter resonator optic gyro based on hollow-core photonic-crystal fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27806-27817.

约稿专家简介:



张春熹(1965—),博士,教授/博士生导师,国家重点研发计划技术首席,国家高技术研究发展计划某主题专家组副组长。1996年在浙江大学光电与科学仪器工程学系获得博士学位。曾任北京航空航天大学光电技术研究所所长、仪器科学与光电工程学院副院长,现任北京航空航天大学光学工程学科责任教授。长期从事光纤陀螺理论、技术与应用研究,实现了我国光纤陀螺多项首次试验,建立了自主知识产权的光纤陀螺研制生产体系,推动了我国光纤陀螺的规模应用。获国家级科技奖励4项,省部级奖励3项。E-mail:zhangchunxi@buaa.edu.cn。