

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.001

# 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用现状 及其关键技术

郑辛<sup>1</sup>, 吴衍记<sup>2</sup>, 于怀勇<sup>2</sup>

(1. 航天科工三院, 北京 100074; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:**光子晶体光纤技术发展迅速, 凭借其自身材料的突出优势已经在干涉式光纤陀螺中得到了应用。从光子晶体光纤的原理出发, 阐述了光子晶体光纤的国内外研究现状和应用于光纤陀螺的潜在优势。同时针对两型光子晶体光纤陀螺: 干涉式光子晶体光纤陀螺和谐振式光子晶体光纤陀螺, 综述了陀螺层级的国内外研究现状及目前面临的主要技术问题, 最后提出了光子晶体光纤陀螺后续发展需要攻克的技术瓶颈。

**关键词:**光子晶体光纤; 光子晶体光纤陀螺; 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:**TH256; TH74; U666.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2017)06-0001-08

## Key Technology & Application Status of the Photonic Crystal Fiber Used in Fiber Optic Gyroscope

ZHENG Xin<sup>1</sup>, WU Yan-ji<sup>2</sup>, YU Huai-yong<sup>2</sup>

(1. The 3<sup>rd</sup> Academy of China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100074, China;  
2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** The technics of photonic crystal fiber (PCF) has been developing quickly these years and successfully applied in the photonic crystal fiber optic gyroscope (PCFOG) for its potential advantage in environmental fluctuation. First, the principle of the PCF and the domestic and overseas research status are introduced in detail. Then a review to two kinds of optic gyroscope, which are interferometric photonic crystal fiber optic gyroscope (IPCFOG) and resonance photonic crystal fiber optic gyroscope (RPCFOG), are given focusing on the technical problem and difficulties. Finally, some advice are given on developing PCFOG.

**Key words:** Photonic crystal fiber; Photonic crystal fiber optic gyroscope; Interferometric photonic crystal fiber optic gyroscope; Resonant photonic crystal fiber optic gyroscope

### 0 引言

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的光纤角速度传感器, 广泛应用于惯性导航和控制领域。1976 年, 美国 Utah 大学的 V.Vali 和 R.WShorthill 成功

研制出世界上第一个光纤陀螺, 标志着第二代光学陀螺——光纤陀螺的诞生, 四十多年来, 世界各国有关研究机构和学者都开展了光纤陀螺的研究工作。

按照光路结构和检测原理的不同, 光纤陀螺可

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-08

基金项目: 装备发展部十三五项目

作者简介: 郑辛(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要从事导航与定位方面研究。

分为干涉式光纤陀螺 (IFOG) 和谐振式光纤陀螺 (RFOG)。目前干涉式光纤陀螺精度范围已经涵盖  $0.001(^{\circ})/h \sim 10(^{\circ})/h$ , 并广泛应用于航空、航天、航海、兵器、定位定向、钻井测斜等领域<sup>[1-9]</sup>。 $10^{-3} (^{\circ})/h \sim 10^{-5} (^{\circ})/h$  的高精度干涉式光纤陀螺的研究和应用已经成为该领域的热点, 代表产品是 2016 年美国 Honeywell 公司研制的  $0.00003 (^{\circ})/h$  的高精度原理样机<sup>[10]</sup>。谐振式光纤陀螺原理上存在与同等精度下干涉式光纤陀螺相比, 体积减少一个数量级以上的技术优势, 代表着将来陀螺高精度、小型化的发展趋势, 同时也是新型光纤陀螺研究的热点和重点。目前谐振式光纤陀螺公开报道的最高精度是 Honeywell 公司于 2017 年研制出的零偏稳定性  $0.1 (^{\circ})/h$  的原理样机, 其性能尚不能满足惯性导航系统的应用需求, 还处于实验室研制阶段。

光纤陀螺的发展方向是高精度和小型化, 目前 IFOG 和 RFOG 在高精度和小型化发展道路上遇到了技术瓶颈。高精度干涉式光纤陀螺中长达数千米的保偏光纤传感环圈在多物理量 (如温度、磁场、压力等) 交互作用下导致陀螺性能严重劣化, 为降低其环境敏感性所采取的众多有效措施 (如多重磁屏蔽、真空密封技术等), 导致其体积、质量和功耗增大, 限制了陀螺性能提升与小型化发展; 谐振式光纤陀螺受传统保偏光纤自身材料特性的影响, 各种非互易性噪声—偏振噪声、背向散射噪声、克尔噪声等严重劣化陀螺性能, 同时受保偏光纤最小弯曲半径的限制, 目前研制的谐振式光纤陀螺样机尺寸与干涉式光纤陀螺相比尚无明显降低。

光子晶体光纤是一种包层由空气孔—石英沿轴向周期性排列所构成的新型光纤。光子晶体光纤具有环境敏感性低、弯曲损耗和弯曲半径小、互易性噪声低等突出优势, 因此采用光子晶体光纤作为光纤陀螺敏感材料, 形成新型光纤陀螺—光子晶体光纤陀螺, 有望解决传统保偏光纤陀螺在性能提升与小型化发展道路上遇到的诸多问题。按照光路结构不同, 光子晶体光纤陀螺可分为干涉式光子晶体光纤陀螺和谐振式光子晶体光纤陀螺。其中干涉式光子晶体光纤陀螺致力于现有干涉式保偏光纤陀螺的整体性能提升, 解决制约环境应用中的诸多难题。与同等精度下传统干涉式光纤陀螺相比, 谐振式光子晶体光纤陀螺原理上存在体积小的技术优势, 也引起了国内外的广泛关注。

## 1 光子晶体光纤简介

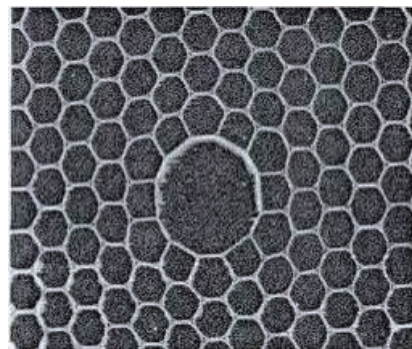
### 1.1 光子晶体光纤的原理及分类

光子晶体光纤是由单一材料的毛细管堆积成一定结构, 利用光纤拉制工艺成型的一种新型微结构光纤。按照截面结构来分, 主要分为空心光子晶体光纤和实心光子晶体光纤。其中空心光子晶体光纤的导光机理与传统光纤完全不同, 它是通过包层光子晶体的布拉格衍射来限制光在纤芯中传播的, 即光子能带理论; 而实心光子晶体光纤的导光机理与传统光纤类似, 即全反射理论。

### 1.2 光子晶体光纤的原理及分类

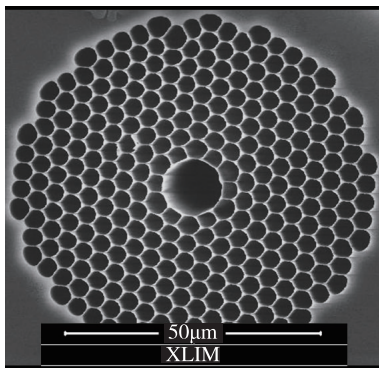
1992 年, Bath 大学的 P. St. J. Russell 首次提出光子晶体光纤的概念。1996 年, P. St. J. Russell 和 J. C. Knight 等利用毛细管堆砌的方法制造了第一根折射率引导型光子晶体光纤<sup>[11-12]</sup>。1998 年 J. C. Knight 等成功研制第一根基于带隙效应的光子晶体光纤, 其截面示意图如图 1(a) 所示<sup>[13]</sup>。2000 年以后, 随着光子晶体光纤传输损耗的降低以及与普通光纤耦合技术的提升, 光子晶体光纤逐渐进入了实用化阶段<sup>[14-15]</sup>。商用化的代表单位是丹麦的 NKT 公司, 该公司具有多型光子晶体光纤产品 (典型产品 HC-1550-PM-01 如图 1(b) 所示)。2013 年, 美国 OFS 公司成功研制高性能保偏光子晶体光纤 (如图 1(c) 所示), 于 2015 年成功将光子晶体光纤传输损耗降低到优于  $5.1 \text{ dB/km}$ , 并应用于光子晶体光纤陀螺样机。2016~2017 年, 法国巴黎南大学在欧洲航天局支持下提出了一种新型 7 胞 Kagome 空心光子晶体光纤 (如图 1(d) 所示), 并与空心带隙光子晶体光纤进行对比分析<sup>[16]</sup>。

国内实心光子晶体光纤的许多关键技术已经取得了重要进展, 并实现了小批量生产, 研制出的干涉



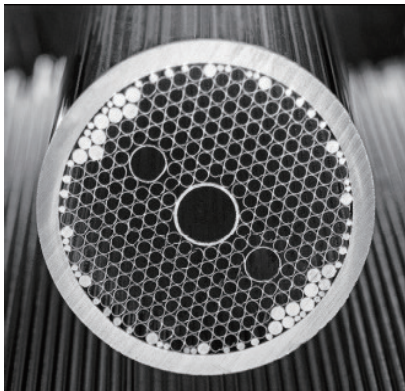
(a) 第一根带隙型光子晶体光纤

(a) The first bandgap photonic crystal fiber



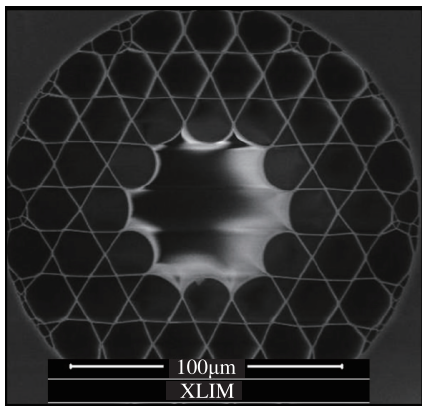
(b) NKT 空心光子晶体光纤

(b) Hollow core photonic crystal fiber of NKT



(c) OFS 空心光子晶体光纤

(c) Hollow core photonic crystal fiber of OFS



(d) Kagome 空心光子晶体光纤

(d) Kagome hollow core photonic crystal fiber

图 1 光子晶体光纤截面示意图

Fig. 1 The section of photonic crystal fiber

式光子晶体光纤陀螺样机精度与同等条件下传统光纤陀螺的精度相当,但光子晶体光纤的潜在优势尚未得到体现。

由于国外技术封锁,空心光子晶体光纤制作水平与国外技术水平相比仍存在一定差距,其性能有待提高,如进一步降低传输损耗、改善结构设计和

制作工艺等;其次,应用于光子晶体光纤陀螺的相关光学器件需要重新设计和改善,从而达到良好的匹配效果。目前,国内在空心光子晶体光纤方面主要依靠国外进口。

### 1.3 光子晶体光纤的潜在优势

光子晶体光纤主要优势体现在:1)弯曲半径小,可以实现直径 20mm 或更小的传感环圈制作,保证了小型化小尺寸的需求;2)光在光子带隙限制的准真空区域内传播,不存在 Shupe 效应、Kerr 效应等寄生效应;3)环境敏感性低。温度系数约为传统单模光纤 SMF-28 的 1/10,非线性效应为 SMF-28 的 1/250、磁场敏感度为 SMF-28 的 1/90。光子晶体光纤的出现为小型化高精度光纤陀螺提供了一种新型技术途径。

总之,光子晶体光纤是一种很有潜力的新型光纤,尽管国外进行了十几年的研究,但是其应用仍处于初级阶段,尚未形成典型的应用产品,技术成熟度远远低于普通的传感光纤,其潜在优势尚未在产品中得到充分证明。

## 2 光子晶体光纤在光纤陀螺中的应用

### 2.1 干涉式光子晶体光纤陀螺

#### 2.1.1 干涉式光子晶体光纤陀螺的国外研究现状

美国的 Stanford 大学、Northrop Grumman 公司、Draper 实验室在干涉式光子晶体光纤陀螺研究方面走在了世界前列,已有干涉式光子晶体光纤陀螺样机的相关报道。

(1) Stanford 大学和 Northrop Grumman 公司

2006 年,在 Northrop Grumman 公司的资助下,Stanford 大学的 Edward L. Ginzton 实验室采用 235m 空心光子晶体光纤绕制光纤环圈,1540nm 宽带掺铒光纤光源和集成光学调制器等搭建了世界第一台干涉式光子晶体光纤陀螺样机,样机的随机游走约为  $0.01(^{\circ})/h^{1/2}$  [17-18]。

2007 年,Stanford 大学进一步理论分析了光子晶体光纤陀螺误差机理,分析表明:空心光子晶体光纤陀螺的非线性 Kerr 效应是传统保偏光纤陀螺的 1/100~1/500,热致 Shupe 温度误差降低到原来的 1/23, Faraday 磁场敏感度降低到原来的 1/200,辐射敏感性降低到原来的 1/50 [19]。

同年,对光子晶体光纤陀螺进行了环境性能测试,测试结果表明:采用空心光子晶体光纤的光纤陀螺,其 Kerr 效应引起的漂移是传统 IFOG 的

1/170,热致 Shupe 系数是传统 IFOG 的 1/6.5, Faraday 效应产生的误差是传统 IFOG 的 1/20。

针对光子晶体光纤应用于光纤陀螺样机中存在的理论优势与实际效果存在较大差距的问题,研究人员通过理论和实验综合分析指出:其主要原因是低损耗光子晶体光纤、高性能光纤传感环圈、高稳定性掺铒光子晶体光纤光源等关键器件及相关技术尚未成熟。

### (2) Draper 实验室

Draper 实验室以全内反射型实心光子晶体光纤作为其光子晶体光纤陀螺研究方案,采用专门委托光纤生产厂家 OFS 公司研制的实心光子晶体光纤,其结构和基本参数分别如图 2 和表 1 所示。

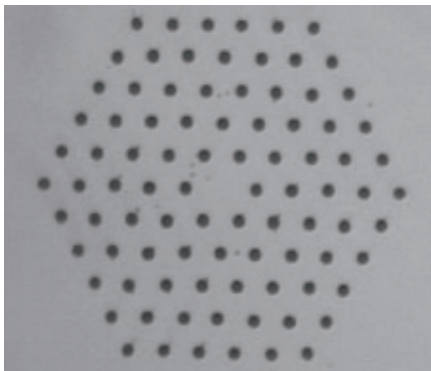


图 2 Draper 实验室用光子晶体光纤结构

Fig. 2 The section of photonic crystal fiber used in Draper lab

表 1 Draper 实验室用光子晶体光纤参数

Tab. 1 The parameter of PCF in Draper lab

光纤参数	尺寸/ $\mu\text{m}$
光纤直径	126
纤芯直径	6.0
孔径	1.5
孔间距	5.2

2006 年, T. Jesse 等采用实心光子晶体光纤替代传统保偏光纤绕制光纤环圈, 分别采用波长 1310nm

的 SLD 和 1532nm 的 SFS 两种宽带光源、单模耦合器和集成光学调制器, 搭建了干涉式光子晶体光纤陀螺原理样机, 零偏稳定性约为  $0.02(^{\circ})/\text{h}^{[20]}$ 。

国外干涉式光子晶体光纤陀螺仍处于实验室样机阶段, 未见工程应用报道, 主要受制于关键器件——光子晶体光纤的技术和成本限制。

### 2.1.2 干涉式光子晶体光纤陀螺的国内研究现状

国内光纤陀螺研制单位也密切关注光子晶体光纤陀螺的研究, “十一五”至“十二五”期间, 相继开展了干涉式光子晶体光纤陀螺的研究工作, 并在“十二五”期间, 取得了长足进步。以北京航空航天大学、浙江大学、航天十三所、航天三十三所等主要光纤陀螺研制单位为代表的干涉式实心光子晶体光纤陀螺样机参加了原总装“十二五”惯性技术联合测试, 参测单位大多采用国产光子晶体光纤绕制光纤环圈, 其他光学器件仍采用传统的单模/保偏光纤方案。光子晶体光纤陀螺样机测试结果: 常温零偏稳定性  $0.0018(^{\circ})/\text{h}$ , 标度因数非线性度  $6.1 \times 10^{-5}$ , 并通过了环境适应性测试, 在同等条件下其整体性能与常规光纤陀螺相当, 略有优势, 现有技术水平没有充分发挥出光子晶体光纤理论上给出的环境性能优势。

## 2.2 谐振式光子晶体光纤陀螺

谐振式光子晶体光纤陀螺原理上存在与同等精度下干涉式光纤陀螺相比, 具有体积减少一个数量级以上的技术优势, 成为小型化高精度发展的潜力方案之一。

### 2.2.1 谐振式光子晶体光纤陀螺国外研究现状

国外光子晶体光纤陀螺研究的代表单位是美国 Honeywell 公司、Northrop Grumman 公司、法国巴黎南大学等, 其中 Honeywell 公司、Northrop Grumman 公司将光子晶体光纤陀螺列到光纤陀螺中长期发展规划中, 作为小型化下实现高精度光纤陀螺的主要技术方案。表 2 给出了各个研究机构谐振式光子晶体光纤陀螺的研制概况<sup>[21-27]</sup>。

表 2 谐振式光子晶体光纤陀螺各个研究机构的研制概况

Tab. 2 The research status of resonance photonic crystal fiber optic gyro

研究机构	时间	技术特点	主要技术指标
Honeywell 公司	2015	采用“空心光子晶体光纤+三激光器复合拍频检测方案”	实测随机游走: $0.0083(0.0002(^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ (补偿前); $0.0077(0.0002(^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ (补偿后)。
	2017	采用“三激光器复合拍频+调制外差技术+硅基光学芯片技术”	实测随机游走: $0.0029(^{\circ})/\text{h}^{1/2}$ ; 实测零偏稳定性: $0.1(^{\circ})/\text{h}$ (1h 测试时间)。

续表

研究机构	时间	技术特点	主要技术指标
Northrop Grumman 公司和 Stanford 大学	2012	采用“20m 7 芯光子晶体光纤”	光子晶体光纤实测指标： 非线性克尔效应降低为 1/250； 温度误差降低为 1/10； 磁场敏感性降低为 1/90； 辐射敏感性降低为 1/50。
DARPA	2013	提出了一种应用于绝对基准领域的新型谐振式光学陀螺	预期指标： 陀螺尺寸:4inch； 零偏稳定性: $<10^{-6}(\text{°})/\text{h}$ ； 角随机游走: $<10^{-6}(\text{°})/\text{h}^{1/2}$ 。
巴黎南大学	2017	理论分析并实验验证了 3 种不同类型与尺寸的空心光子晶体光纤用于谐振式光纤陀螺的技术特点	陀螺预期指标： 克尔噪声降低 3 个数量级以上； 理论随机游走 $<0.0014(\text{°})/\text{h}^{1/2}$ 。

### 2.2.2 谐振式光子晶体光纤陀螺国内研究现状

国内在谐振式光子晶体光纤陀螺方面的研究目前仍处于起步阶段,北京航空航天大学、浙江大学、航天三院三十三所等单位开始了谐振式光子晶体光纤陀螺的研究,采用标准仪器搭建的谐振式陀螺的实验室原理样机精度优于  $1(\text{°})/\text{h}^{[28-37]}$ 。

但是受限于低传输损耗光子晶体光纤、高性能光子晶体光纤谐振腔和模块化光源等关键器件的发展相对滞后,加之适用于谐振式光纤陀螺专用的信号检测手段、噪声分析抑制及性能提升等关键技术水平尚未成熟,使得光子晶体光纤陀螺整体水平与国外相比仍存在一定差距。

## 3 主要技术问题

### 3.1 高性能光子晶体光纤仿真设计与优化制作

光子晶体光纤是构建光子晶体光纤陀螺的核心材料,其传输损耗、偏振消光比等参数直接决定角速度敏感单元(光子晶体光纤环圈或者光子晶体光纤谐振腔)的主要性能,进而影响光子晶体光纤陀螺性能。

光子晶体光纤的性能与其结构密切相关,光纤的偏振消光比、单模传输特性、色散、非线性等受空气孔孔径和孔距以及孔排列方式的影响。对于制做光子晶体光纤最常用的管束堆积法,如何设计包层空气孔半径、孔间距以及排列结构,如何保持空气孔的横纵向均匀性,降低光子晶体光纤的传输损耗,进而降低敏感环路的传输损耗,提升陀螺极限灵敏度,是光子晶体光纤实用化进程中亟待解决的技术难题;光纤横截面上空气孔尺寸的不均匀性和空气孔位置排列的不均匀性会引起光子晶体光纤消光比的严重劣化,而消光比的变化会在光子晶体

光纤陀螺中引入偏振耦合噪声,制约了陀螺的环境适应性。

总之,在光子晶体光纤方面主要存在以下问题:

- 1) 光纤陀螺对光子晶体光纤的要求尚未形成完整的指标体系和测量验证体系;
- 2) 光子晶体光纤的制作工艺尚不完善,理论优势没有得到充分发挥。

### 3.2 光子晶体光纤与保偏光纤熔接技术

在光子晶体光纤与保偏光纤熔接或者光子晶体光纤自身对熔过程中,光子晶体光纤内部的空心气孔结构不断变化,端面模场匹配度、熔接损耗和偏振串音急剧改变,严重影响陀螺性能,因此光子晶体光纤低损耗熔接技术成为了光子晶体光纤陀螺研制过程中的主要难点和关键技术,需要重点解决的问题如下。

#### 3.2.1 空气孔塌陷

熔接机在熔接两光纤时,两光纤端被加热熔化后推压形成一个节点,然而光子晶体光纤具有小的硅玻璃面积(包层中空气孔的结构),所以光子晶体的熔点小于普通光纤的熔点。假定光子晶体光纤和普通光纤的热吸收系数相同,空气孔的塌缩速率可表示为

$$v_c = \frac{\gamma}{2\eta} \quad (1)$$

其中, $\gamma$  表示表面张力, $\eta$  表示黏性。硅玻璃的表面张力对熔接过程中的温度不是很敏感,但是黏性随着温度的升高会迅速下降,因此,孔的塌缩速率将随着温度的升高而加速。如果用熔接普通光纤的参量去熔接光子晶体光纤,由于总的放电能量太高而导致光子晶体光纤空气孔的完全塌缩,光子晶体光纤的导光结构被破坏而引起熔接点的高

损耗。

### 3.2.2 模场不匹配

典型的光子晶体光纤和 PANDA 保偏光纤存在明显的不匹配,其理论的耦合损耗可由式(2)计算

$$Loss = -10 \log \frac{4}{\left(\frac{MFD_1}{MFD_2} + \frac{MFD_2}{MFD_1}\right)^2} \quad (2)$$

$MFD_1$  和  $MFD_2$  分别表示光子晶体光纤和保偏光纤的模场直径,由式(2)可知,当两种光纤的模场直径相等或者相差很小时,模场失配损耗会很小,这样只要选择好熔接机的熔接参数,不破坏光子晶体光纤的空气孔,熔接损耗将会很低。然而对于模场直径相差很大的光纤之间的熔接,尽管光子晶体光纤空气孔没有被破坏,熔接后的损耗仍然很大,主要是因为两种光纤的模场直径不匹配所引起的。

### 3.2.3 熔接可靠性

光纤的高质量熔接不仅要求高的耦合效率,还要求高的熔接强度。因此在设置熔接参量时,既要考虑低损耗熔接功率区间的限制,同时又要兼顾熔接强度的要求,即熔接过程的熔接电流不能过低,否则两光纤末端不能充分软化接合,接头易脆易断,严重影响熔接结果。另外空气孔的存在会导致光子晶体光纤包层等效导热系数降低,外围向芯区导热的速度比保偏光纤要慢,因此以相对长时间的小电流加热更有助于使光纤横向各部分受热均匀,带来更好的熔接结果。因此在选取最优化熔接参量组合时,应尽量选择相对小的熔接电流和相对较长的放电时间。如何同时提升熔接强度、传输损耗等参数是提升光子晶体光纤与保偏光纤熔接可靠性的主要技术问题。

## 3.3 光子晶体光纤关键器件设计及实现技术

光子晶体光纤陀螺无论是干涉式还是谐振式的终极目标就是实现陀螺内部光纤器件全部采用光子晶体光纤,在这个过程中主要的技术难点是光子晶体光纤环圈、光子晶体光纤谐振腔、光子晶体光纤光源、光子晶体光纤耦合器、光子晶体光纤调制器等光学器件的设计与制做技术。

上述光学器件的设计与制做技术主要分为三个技术点:一是光子晶体光纤专有的环圈制做技术;二是光子晶体光纤的端面处理技术;三是光子晶体光纤准直器技术。掌握了这三项技术后就可以完全实现上述光子晶体光纤器件的设计与制做,

形成完全的光子晶体光纤陀螺。

### 3.3.1 光子晶体光纤环圈制作技术

光子晶体光纤环圈是光子晶体光纤陀螺的核心敏感部件,其性能直接决定陀螺精度和温度适应性。光子晶体光纤环圈温度变化引起的光纤陀螺误差可表示如下<sup>[38]</sup>

$$\Delta\Omega = n^2 S \frac{L}{D} \int_0^1 (1-2u) T(u) du \quad (3)$$

其中, $n$  为光纤折射率, $u = z/L$ , $z$  为光纤上一点。 $S$  为光纤的 Shupe 系数,表示如下

$$S = \left(\frac{1}{\varphi}\right) \frac{d\varphi}{dT} \quad (4)$$

$\varphi$  为一段光纤  $dl$  发生  $dT$  温度变化时产生的相位延迟,与光纤热场分布、温度偏振串扰、折射率温度系数以及应力温度系数相关。由式(4)可知,当光子晶体光纤环相对于中点完全对称时,陀螺因温度引入误差为零,因此提高光子晶体光纤环圈绕制对称性是光纤环圈设计所追求的目标。

由于光子晶体光纤环圈折射率和 Shupe 系数都比保偏光纤小,因此在同样的对称性下,光子晶体光纤陀螺的温度性能更佳。但是光子晶体光纤的多孔结构特点使得环圈绕制过程异常艰难,在环圈绕制和点胶固化过程中又很难保证光子晶体光纤结构不发生变化,从而引起环圈结构对称性的变化,这是光子晶体环圈的制作难点。

### 3.3.2 光子晶体光纤端面处理技术

光子晶体光纤端面处理程度直接影响光子晶体光纤耦合熔接效率,以及输出光质量,最终影响光子晶体光纤陀螺性能。光子晶体光纤端面处理与传统保偏光纤有所区别,尤其是在去除涂覆层、切割等环节上。另外,在构建光子晶体光纤器件上需要考虑采取特殊工艺和技术手段来封闭光纤端面的毛细管孔是光子晶体光纤关键器件的关键工艺之一。

### 3.3.3 光子晶体光纤准直器技术

光子晶体光纤准直器是实现高性能光子晶体光纤谐振腔的重要组件,由光子晶体光纤尾纤和准直透镜组成,其主要功能是将光子晶体光纤端面出射的发散光束变换为平行光束,随后将平行光束会聚并高效耦合进入光子晶体光纤谐振腔。光子晶体光纤准直器的插入损耗、回波损耗、光束发散角等参数指标直接决定谐振腔性能。同时在光子晶体光纤准直器加工过程中,不仅要确保上述参数指标的实现,同时还必须确保准直器的高稳定性、高

可靠性、体积小等特点,因此光子晶体光纤准直器的设计及加工是目前光子晶体光纤陀螺研制过程中的关键技术。

#### 4 结论

为改善高精度干涉式光纤陀螺的环境适应性,国内外采取了很多行之有效的措施,但由此引起了其体积、质量的明显增大,在很大程度上制约了其发展和应用。光子晶体光纤具有温度、磁场敏感性低等潜在优势,是解决高精度光纤陀螺环境适应性问题的途径之一。

但是,光子晶体光纤及其相关元器件的发展尚处于起步阶段,要想真正发挥其潜在优势,解决目前干涉式光纤陀螺遇到的问题,还需要在光子晶体光纤、光子晶体光纤相关元器件和陀螺整体技术方面进行大量的研究工作,而不仅仅是光纤传感环圈的简单替代。

#### 参考文献

- [1] Lefevre H C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope[J]. *Optical Review*, 1997, 4(1A): 20-27.
- [2] Zarinetchi F, Ezekiel S. Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(6): 401-403.
- [3] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
- [4] Takiguchi K, Hotate K. Method to reduce the optical Kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1992, 4(2): 203-206.
- [5] Burns W. Optical fiber rotation sensing[M]. USA: Academic Press Inc, 1994.
- [6] Armenise M N, Ciminelli C, Dell'Olio F, et al. Advances in gyroscope technologies [M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [7] Carrara S L A, Kim B Y, Shaw H J. Bias drift reduction in polarization-maintaining fiber gyroscope [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(3): 214-216.
- [8] Meyer R E, Ezekiel S, Stowe D W, et al. Passive fiber-optic ring resonator for rotation sensing [J]. *Optics Letters*, 1983, 8(12): 644-646.
- [9] Armenise M N, Passaro V M N, De Leonardi F, et al. Modeling and design of a novel miniaturized integrated optical sensor for gyroscope systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(10): 1476-1494.
- [10] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[C]// Proceedings of the SPIE Commercial+ Scientific Sensing and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2016: 985207-14.
- [11] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [12] Knight J C, Birks T A, Atkin D M, et al. Pure silica single-mode fibre with hexagonal photonic crystal cladding[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 1996: 339-342.
- [13] 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.
- [14] Knight J C. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [15] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059.
- [16] Fsaifes I, Feugnet G, Ravaille A, et al. A test resonator for Kagome Hollow-core Photonic Crystal Fibers for resonant rotation sensing[J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 485-490.
- [17] Kim H K, Dangui V, Digonnet M, et al. Fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber [C]//17<sup>th</sup> International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2005: 198-202.
- [18] 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.
- [19] Digonnet M J F, Kim H K, Blin S, et al. Sensitivity and stability of an air-core fiber-optic gyroscope[C]//Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 2006: ME1.
- [20] Tawney J, Hakimi F, Willig R L, et al. Photonic crystal fiber IFOGs[C]//Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 2006: ME8.
- [21] Sanders G A, Prentiss M G, Ezekiel S. Passive ring resonator method for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(11): 569-571.
- [22] Sanders G A, Strandjord L K, Qiu T. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing[C]//

- Optical Fiber Sensors, 2006.
- [23] Strandjord L K, Qiu T, Wu J, et al. Resonator fiber optic gyro progress including observation of navigation grade angle random walk[C]//OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. International Society for Optics and Photonics, 2012; 842109-5.
- [24] Wu J, Smicklas M, Strandjord L K, et al. Resonator fiber optic gyro with high backscatter-error suppression using two independent phase-locked lasers[C]//24<sup>th</sup> International Conference on Optical Fibre Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2015; 963410.
- [25] Benser E, Sanders G, Smickilas M, et al. Development and evaluation of a navigation grade resonator fiber optic gyroscope[C]// 2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). IEEE, 2015; 1-11.
- [26] Strandjord L K, Qiu T, Wu J, et al. Resonator fiber optic gyro progress including observation of navigation grade angle random walk[C]//OFS2012 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensor. International Society for Optics and Photonics, 2012; 842109-5.
- [27] Zhao X, Louveau J, Chamoun J, et al. Thermal sensitivity of the birefringence of air-core fibers and implications for the RFOG[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(14): 2577-2581.
- [28] Yu H, Lei M, Li J, et al. Key technics and experimental research of resonance photonic crystal fiber optical gyroscope[C]//International Conference on Inertial Technology and Navigation. Inertial Sensor Technology, 2016; 120-130.
- [29] 于怀勇, 吴衍记, 雷明, 等. 硅基波导谐振腔特性分析与实验研究[J]. 导航定位与授时, 2015, 2(2): 46-53.
- [30] 李建华, 于怀勇, 吴衍记, 等. 谐振式光纤陀螺用激光器性能研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(2): 71-76.
- [31] Yu H, Zhang C, Feng L, et al. Limitation of rotation sensing in IORG by Rayleigh backscattering noise[J]. EPL (Europhysics Letters), 2011, 95(6): 64001.
- [32] Hong L, Zhang C, Feng L, et al. Effect of phase modulation nonlinearity in resonator micro-optic gyro[J]. Optical Engineering, 2011, 50(9): 094404-5.
- [33] Lei M, Feng L, Zhi Y, et al. Current modulation technique used in resonator micro-optic gyro[J]. Applied Optics, 2013, 52(2): 307-313.
- [34] Lei M, Feng L, Zhi Y, et al. Effect of intensity variation of laser in resonator integrated optic gyro[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4576-4581.
- [35] Lei M, Feng L, Zhi Y, et al. Experiments on resonator micro-optic gyro using external cavity laser diode[J]. Optical Engineering, 2012, 51(10): 104602-1-5.
- [36] Jin Z, Yu X, Ma H. Resonator fiber optic gyro employing a semiconductor laser[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2856-2864.
- [37] Ying D, Mao J, Li Q, et al. A miniaturized compact open-loop RFOG with demodulation signal compensation technique to suppress intensity modulation noise[J]. Optics Communications, 2016, 359: 364-371.
- [38] Digonnet M J F, Kim H K, Blin S, et al. Sensitivity and stability of an air-core fiber-optic gyroscope[C]// Optical Fiber Sensors. Optical Society of America, 2006; ME1.