

基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔研究

冯丽爽^{1,2} 邓学文^{1,2} 任小元^{1,2} 刘惠兰^{1,2}

(¹ 北京航空航天大学新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)
(² 北京航空航天大学微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 光纤环形谐振腔是构成谐振式光纤陀螺的核心部件。提出了一种基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔。建立了这种谐振腔的归一化传递函数模型, 并且仿真分析了微光学结构参数与谐振腔特性和陀螺的极限灵敏度的关系。研制出基于微光学结构的空芯光子带隙光纤谐振腔的实验样品, 完成了样品性能测试, 在此基础上提出了下一步优化方案。研究结果为未来进一步研究基于微光学结构的谐振式空芯光子带隙光纤陀螺提供了理论和实验依据。

关键词 光纤光学; 光纤环形谐振腔; 空芯光子带隙光纤; 微光学结构; 谐振式光学陀螺

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0806002

Research on Hollow Core Photonic Bandgap Fiber Ring Resonator Based on Micro-Optics Structure

Feng Lishuang^{1,2} Deng Xuewen^{1,2} Ren Xiaoyuan^{1,2} Liu Huilan^{1,2}

¹ *Fundamental Science on Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China*
² *Key Laboratory of Micro-Nano Measurement-Manipulation and Physics, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract Fiber optic ring resonator (FRR) is the core unit of resonator fiber optic gyro (RFOG). A novel type of ring resonator of hollow core photonic bandgap fiber (HC-PBF) based on micro-optics structure is demonstrated. The normalized transfer function of such kind of FRR is built. Then simulations are done to formulate the relations of the resonator performance and the shot-noise-limited sensitivity of RFOG caused by optical parameters of FRR. The laboratory sample of HC-PBF ring resonator based on micro-optics structure is made and its performance is tested. An optimum design is put forward based on the test data. The research results provide the basis for further research of HC-PBF RFOG based on micro-optics structure.

Key words fiber optics; fiber ring resonator; hollow core photonic bandgap fiber; micro-optics structure; resonator optic gyro

OCIS codes 060.2310; 230.5750; 060.4005; 350.3950

1 引 言

光纤陀螺是一种采用萨尼亚克(Sagnac)效应作为测量原理的角速度传感器^[1]。目前干涉式光纤陀螺技术(IFOG)已经相对成熟,在惯性导航、石油钻井、机器人控制等方面获得了广泛应用^[2]。但IFOG需要长度较长的光纤,尺寸难以进一步减小,而且IFOG对外界环境极其敏感,需要采用优化的

结构设计和热设计、特殊的光纤绕制、更完善的信号检测方案及有效的屏蔽技术等,使得IFOG结构复杂,成本较高^[3]。而谐振式光纤陀螺(RFOG)采用光纤环形谐振腔(FRR)的Sagnac效应来测量角速度,相比IFOG具有光纤长度短、检测精度高、动态范围大的特点^[4]。然而采用普通光纤的RFOG却易受到外界应力扰动、温度波动等的影响,并且

收稿日期: 2012-02-20; 收到修改稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(220297)资助课题。

作者简介: 冯丽爽(1968—),女,博士,教授,主要从事微光学惯性器件方面的研究。E-mail: fenglishuang@buaa.edu.cn

RFOG 需要采用高相干光^[5], 容易引起较大噪声干扰^[6,7]。为了克服这些影响, 采用空芯光子带隙光纤(HC-PBF)的 RFOG 的方案被提出^[8]。HC-PBF 相对于普通光纤, 其克尔效应、法拉第效应和瑞利散射都有望减小 2~3 个量级^[9], 因而可以极大地提高 RFOG 的精度^[10]。目前, 鉴于 HC-PBF 与普通光纤耦合的困难, 并且考虑到 HC-PBF 具有低的自由空间耦合损耗, 已有报道的 HC-PBF 环形谐振腔多采用空间耦合方式。已有的空间耦合方式包括双分光镜^[11]、部分反射的弯月正透镜^[12]等结构, 但以上结构实施均相对复杂。2010 年, Honeywell 公司提出了微光学光子带隙光纤耦合器结构, 并利用该耦合器构造了透射式 FRR^[13]。透射式 FRR 其信噪比要低于反射式 FRR, 另外其梯度折射率材料透镜双侧反射膜的使用易对 FRR 的互易性造成较大影响。

本文提出了一种新型的基于微光学分光镜耦合结构的反射式 FRR, 首先对此种 FRR 进行了理论推导和仿真, 然后给出了实际样品的测试结果, 最后对所设计的样品进行了优化分析。

2 基于微光学结构的 FRR 设计

2.1 基于微光学结构的 FRR

基于微光学结构的 FRR 结构如图 1 所示, c, d, e, f 为准直透镜; g, h 为双芯毛细管; 1, 4 端接 FRR 的输入和输出, 为保偏光纤(PMF), 2, 3 端为 HC-PBF。微光学分光镜在此 FRR 中取代了一般的光纤耦合器的角色。通过在靠近 HC-PBF 的一侧镀高反膜 b, 靠近 PMF 的一侧镀高透膜 a, 可以实现类似于光纤耦合器的分光作用。光纤的相对位置用两个双芯毛细管来固定, 整个微光学结构的相对位置

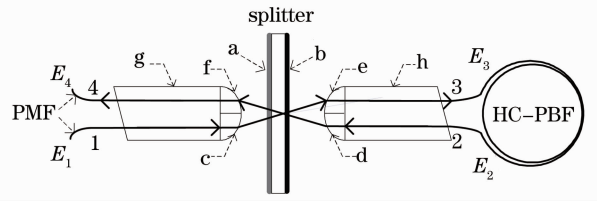


图 1 基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔示意图
Fig. 1 Schematic of HC-PBF ring resonator based on micro-optics structure

在确定以后也用一个保护套固定, 但在图 1 中没有标出。

2.2 FRR 的数学模型

由于基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔和基于光纤耦合器耦合原理的不同, 其谐振腔特性也可能存在区别。因此, 需要从理论上推导基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔的归一化传递函数表达式来分析其谐振腔特性。

设高透面 a 的强度透射率为 T_a (之后简称为透射率, 但依然为强度量; 反射率、损耗类似), 高反面 b 的强度反射率为 R_b (令 $k=1-R_b$), 光从一个准直透镜到另一个准直透镜的强度损耗为 α_c (即耦合损耗, 假设对于不同光路耦合损耗相等), HC-HBF 长度为 L , 单位长度光纤损耗为 α_l , 折射率为 n , 激光器中心角频率为 ω , 线宽为 $\Delta\omega$ 。特别地, 假设结构中所有的光纤均具有偏振保持特性, 因此在下面的分析之中不考虑偏振因素。

FRR 光路如图 1 所示, 光在微光学分光镜的高反膜处, 一部分发生透射, 另一部分发生反射, 在输出端形成多光束干涉。虽然此 FRR 的耦合方式与普通的光纤耦合方式工作原理不同, 但最终构成了类似的法布里-珀罗(F-P)光纤谐振腔结构^[14,15]。利用多光束干涉理论^[16], 可以推导得到出射光的表达式

$$E_4 = E_0 T_a \exp(i\omega t) \{ T \exp[i\phi(t)] + R' \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} (Q')^{m-1} \exp(-i\omega m t) \exp[i\phi(t - m\tau)] \}, \quad (1)$$

式中 $T = \sqrt{(1-\alpha_c)(1-k)}$, $R' = (1-\alpha_c)k \exp(-\alpha_l L/2)$, $Q' = \sqrt{(1-\alpha_c)(1-k)} \exp(-\alpha_l L/2)$ 。此公式与基于光纤耦合器的 FRR 的输出函数形式一致, 因此可以得到如下的相关表达式。

1) 归一化传递函数 T_{FRR} :

$$T_{\text{FRR}} = \left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = T_a^2 \left[T^2 + \frac{2TR(\cos \omega\tau + Q)}{1 + Q^2 + 2Q\cos \omega\tau} + \frac{(R')^2}{1 - (Q')^2} \cdot \frac{1 - Q^2}{1 + Q^2 + 2Q\cos \omega\tau} \right], \quad (2)$$

式中的参数为 $\tau = \frac{Ln}{c}$, $Q = \sqrt{(1-\alpha_c)(1-k)} \exp(-\Delta\omega\tau - \alpha_l L/2)$, $R = k(1-\alpha_c) \exp(-\Delta\omega\tau - \alpha_l L/2)$ 。同时

$$\text{可以推得 } T_{\text{FRR}}^{\text{max}} = T_a^2 \left[T^2 + \frac{2TR}{1+Q} + \frac{(R')^2}{1-(Q')^2} \cdot \frac{1-Q}{1+Q} \right], T_{\text{FRR}}^{\text{min}} = T_a^2 \left[T^2 - \frac{2TR}{1-Q} + \frac{(R')^2}{1-(Q')^2} \cdot \frac{1+Q}{1-Q} \right].$$

2) 谐振深度 ρ :

$$\rho = \frac{T_{\text{FRR}}^{\max} - T_{\text{FRR}}^{\min}}{T_{\text{FRR}}^{\max}} \quad (3)$$

3) 谐振清晰度:

$$\text{令 } A = \frac{(R')^2}{1 - (Q')^2}, B = 1 - Q^2, C = 1 + Q^2, \text{ 则}$$

谐振腔线宽 Γ 和 谐振清晰度 F 分别为

$$\Gamma = \frac{\arccos\left(\frac{AB^2 + 2TRQB - AC^2 + 2TRQC}{ATRQ^2 - 2QAC + 2TRB}\right)}{\tau\pi} \quad (4)$$

$$F = \frac{\pi}{\arccos\left(\frac{AB^2 + 2TRQB - AC^2 + 2TRQC}{ATRQ^2 - 2QAC + 2TRB}\right)} \quad (5)$$

4) 陀螺极限灵敏度:

在 RFOG 中, 由光探测器散弹噪声决定的极限灵敏度为

$$\Delta\Omega \approx \frac{\lambda P}{4A_f} \frac{\sqrt{2}\Gamma}{R_{\text{SN}}} \quad (6)$$

式中 P 为单圈光纤周长, A_f 为单圈光纤环包围的面积, Γ 为 FRR 的谐振谱线宽度, R_{SN} 为测试系统的信噪比。

2.3 数值仿真

为了深入了解高反膜反射率 R_b 、耦合损耗 α_c 和激光器线宽 $\Delta\omega$ 对谐振深度 ρ 、谐振清晰度 F 和陀螺极限灵敏度 $\Delta\Omega$ 的影响, 进行了详细的仿真分析。初

始设置 $R_b=0.9, \alpha_c=0.1, \Delta\omega=30 \text{ kHz}$, 每次仿真只改变其中 1~2 个参数的值。其他参数取值分别为 $L=1.6 \text{ m}, T_a=0.99, \alpha_f=0.0039 \text{ m}^{-1}, \lambda=1.55 \text{ }\mu\text{m}, n=0.99, \eta=99\%, t=10 \text{ s}, A_f=0.20 \text{ m}^2$ 。

图 2 给出了高反膜反射率 R_b 、耦合损耗 α_c 、激光器线宽 $\Delta\omega$ 对谐振深度 ρ 的影响。其中图 2(a) 仿真了在 R_b 取值不同时 ρ 随 α_c 的变化曲线。在曲线中, ρ 随着 α_c 的增加先增大后减小, 在满足最佳谐振条件 ($R_b + \alpha_c = 1$) 时达到最大值。通常最佳谐振条件中的损耗是谐振腔的总损耗, 而此处损耗主要体现为耦合损耗。并且在 α_c 较大的区域, R_b 越小, ρ 越大。图 2(b) 是在 R_b 和 α_c 满足最佳谐振条件下仿真得到的。从图 2(b) 中可以看出, 随着 $\Delta\omega$ 的变大, ρ 几乎线性减小, 当激光器的线宽在 1 MHz 以下时, ρ 达到 0.95 以上, 在 10 MHz 时下降到 0.67。FRR 的谐振特性受到 $\Delta\omega$ 和 谐振腔的谐振频率 $f = 1/\tau$ 构成的因子 $\exp(-\Delta\omega/f)$ 的影响。在 $L=1.6 \text{ m}$ 时, 谐振频率 $f = 189 \text{ MHz}$, 如果 $\Delta\omega = 1 \text{ MHz}$, 则 $\exp(-\Delta\omega/f) = 0.9947$, 此时对谐振谱特性影响较小。随着 $\Delta\omega$ 变大, $\Delta\omega$ 对谐振谱特性的影响将会指数级地增加。综合分析图 2(a) 和 (b) 可知, R_b 和 α_c 的取值是否满足最佳谐振条件是谐振腔能否获得较高 ρ 值的关键因素。

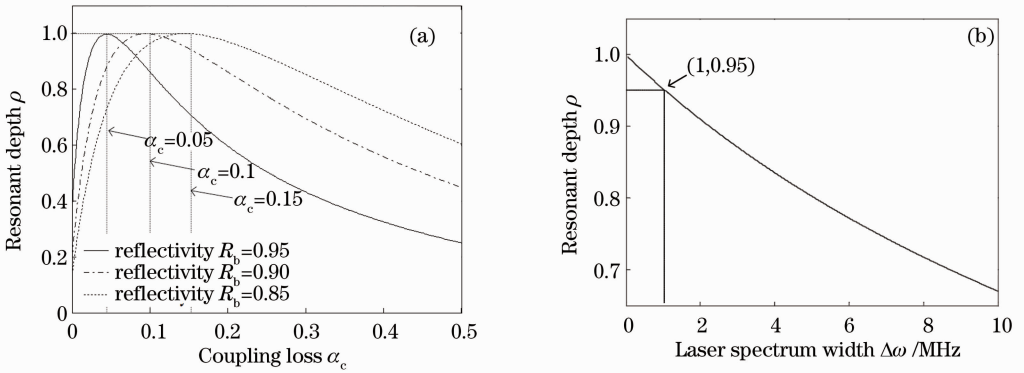


图 2 不同光路参数与谐振深度的关系。(a) 高反膜反射率和耦合损耗; (b) 激光线宽

Fig. 2 Relation between different optical parameters and resonant depth. (a) Reflectivity and coupling loss; (b) laser spectrum width

图 3 给出了高反膜反射率 R_b 、耦合损耗 α_c 、激光器线宽 $\Delta\omega$ 对谐振清晰度 F 的影响。其中图 3(a) 给出了 F 在 R_b 不同取值时随 α_c 的变化曲线。结果表明 F 随 R_b 增大而增大, 随 α_c 增大而减小。在 $R_b=0.95, \alpha_c=0.05$ 时, F 可达到 57.67; 而在 $R_b=0.90, \alpha_c=0.10$ 时, F 下降到 29.31, 并且随着 R_b 的减小和 α_c 的增加, F 迅速减小到 20 以下。图 3(b) 给出

了 F 随 $\Delta\omega$ 的变化曲线。在 $\Delta\omega < 1 \text{ MHz}$ 时, F 保持在 27 以上, 随着 $\Delta\omega$ 增加到 10 MHz, F 会减小到 19.55。可以看出, 在 $\Delta\omega < 1 \text{ MHz}$ 的情况下, 尽可能减小 α_c 同时增大 R_b 是提高 F 值的主要途径。

图 4 给出了高反膜反射率 R_b 、耦合损耗 α_c 和激光器线宽 $\Delta\omega$ 对陀螺极限灵敏度 $\Delta\Omega$ 的影响。图 4(a) 给出了 $\Delta\Omega$ 在 R_b 不同的取值时随 α_c 的变化曲线, 曲

线可以粗略划分为 $\alpha_c < 0.1$ 和 $\alpha_c > 0.3$ 两个区域。在 $\alpha_c < 0.1$ 的区域, 相同的 α_c 下, R_b 越大, $\Delta\Omega$ 越高, 并且在这个区域出现了 $\Delta\Omega$ 的最小值。不同的 R_b 有不同的 $\Delta\Omega_{\min}$, 图 4(a) 中放大的小图给出了每条曲线最小值点的坐标。而在 $\alpha_c > 0.3$ 的区域, 相同的 α_c 下, R_b 越小, $\Delta\Omega$ 反而越大。 R_b 越小, 意味着更多的能量进入到谐振腔内部, 可以补偿 α_c 较大时

对 $\Delta\Omega$ 的影响。因此对于谐振腔 α_c 较大的情况, 适当地减小 R_b 可以有效地提高 $\Delta\Omega$ 。而图 4(b) 给出了 $\Delta\Omega$ 随 $\Delta\omega$ 的变化曲线。从图 4(b) 中可以发现在 $\Delta\omega > 1$ MHz 后, $\Delta\omega$ 对 $\Delta\Omega$ 有较大影响, $\Delta\Omega$ 会从 0.03 ($^\circ$)/h 降低到 0.07 ($^\circ$)/h。因此, 要想获得高的 $\Delta\Omega$, 必须选用线宽小的激光器, 同时必须尽可能减少 α_c 并且合理地设计 R_b 大小。

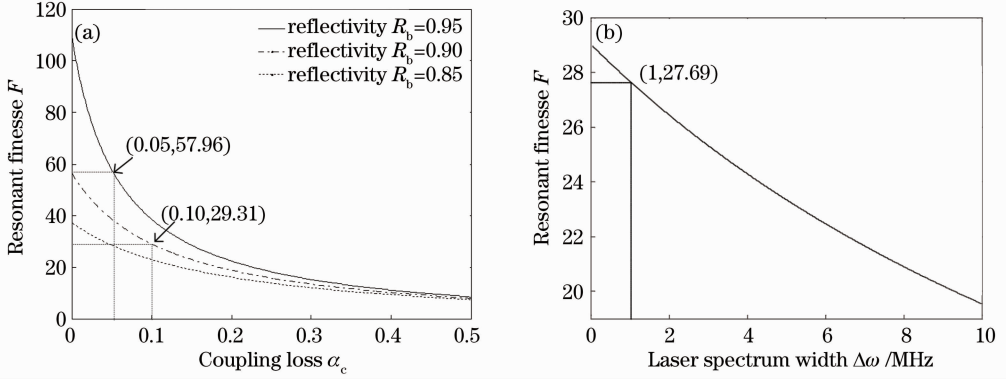


图 3 不同光路参数与谐振清晰度的关系。(a)高反膜反射率和耦合损耗;(b)激光器线宽

Fig. 3 Relation between different optical parameters and resonant finesse. (a) Reflectivity and coupling loss; (b) laser spectrum width

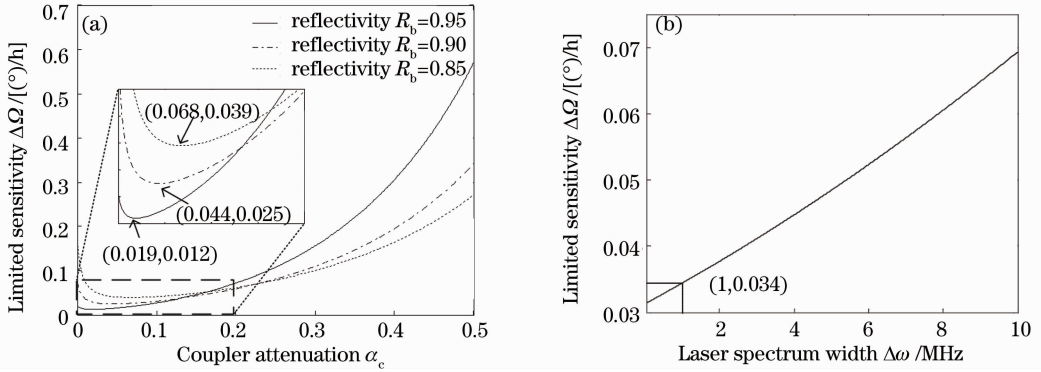


图 4 不同光路参数与极限灵敏度的关系。(a)高反膜反射率和耦合损耗;(b)激光器线宽

Fig. 4 Relation between different optical parameters and limited sensitivity. (a) Reflectivity and coupling loss; (b) laser spectrum width

3 实验研究

为了验证方案的可行性, 实际制作了基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔, 如图 5(a) 所示。整个 FRR 由 HC-PBF、保偏光纤和基于微光学结构的耦合器组成。耦合器中包括准直透镜和分光镜。分光镜的反射率为 0.9, HC-HBF 的长度为 1.6 m。所有器件均通过封装集成在一起, 减少了外界干扰。

对 FRR 进行了光源扫频实验测试, 实验原理如图 5(b) 所示。选用的激光器其中心波长为 1550.0 nm, 线宽小于 30 kHz。因此激光器线宽对谐振腔性能的影响可以忽略。通过信号发生器调节激光器的中心频

率, 在示波器上观察谐振腔的谐振曲线输出, 扫频范围约为 16.2 GHz。光电探测器采用光电二极管/场效应晶体管 (PIN/FET) 探测器, 光电转换效率为 0.92 A/W, 跨阻为 40 k Ω , 输入光强为零时, 输出负偏压为 -1.63 V。

测试的实验结果如图 6 所示。图 6 中给出的谐振曲线表明此 FRR 能够产生明显的谐振。FRR 谐振清晰度为 11.75, 谐振深度为 0.087。利用 (3) 式和 (5) 式, 可以反求出 $R_b = 0.9879$, $\alpha_c = 0.41$ 。此结果与 Honeywell 公司的空间耦合方案的谐振腔损耗 0.07 相比还有很大的改善空间。改进的途径

包括准直透镜参数的优化和耦合器各部件相对位置的优化,而各部件的相对位置依赖于准直透镜设计,

因此对准直透镜参数的进一步优化设计是减小耦合损耗的工作重点。

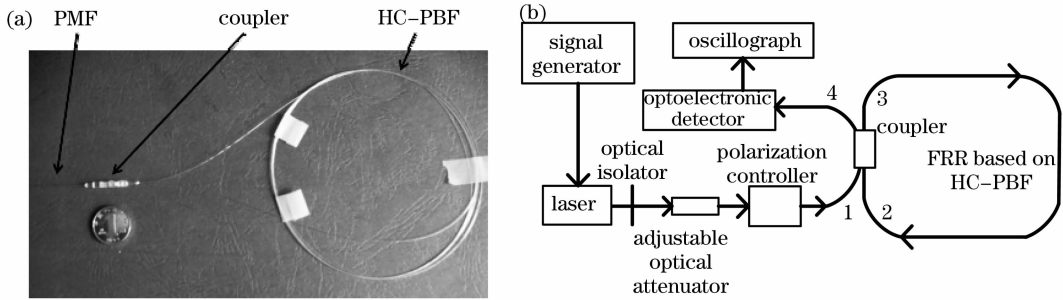


图 5 基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔实物图和实验原理图。(a)实物图；(b)实验原理图

Fig. 5 HC-PBF ring resonator based on micro-optics structure and experimental setup. (a) Sample of the FRR; (b) experimental setup

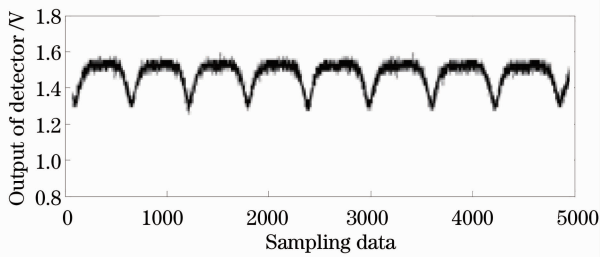


图 6 基于微光学结构的 HC-PBF 谐振腔测试曲线
Fig. 6 Resonance curve of HC-PBF ring resonator based on micro-optics structure

由于工艺本身的原因,耦合损耗暂不可能做到很小,因此根据前面的仿真分析,适当修改高反膜的反射率是十分必要的。针对 $\alpha_c = 0.4$,进行了仿真优化。如果耦合损耗 $\alpha_c = 0.4$,高反膜反射率 R_b 需要减少到 0.77 附近才能获得最高为 $0.15 (^{\circ})/h$ 的极限灵敏度,相对 $R_b = 0.9$ 时提高了 22%。

同时测量得到 FRR 端口 1 到端口 4 的消光比约为 17 dB。这个数值可以作为耦合器中各端口之间消光比准确值的一个参考。相比目前普通的保偏光纤耦合器的消光比(大于 20 dB),这个结果还有一定差距,但与已有报道的 PMF 与 HC-PBF 熔接耦合后的消光比(19 dB)相比基本一致^[17]。考虑到使用普通光纤耦合器构成 HC-PBF 环形谐振腔会引入两个熔接点,使总的耦合损耗增加且消光比降低,因此基于微光学结构的耦合器的 HC-PBF 环形谐振腔具有明显的优势。

另外,对 FRR 耦合损耗的准确测量需要将 FRR 的 HC-PBF 从中间断开,这将彻底破坏现有谐振腔结构。为了不破坏现有腔的结构,并且对 FRR 耦合特性进行精确的测试,目前正在制作一个基于微光学结构的 HC-PBF 耦合器,相关测试结果将在

后续工作中报道。

4 结 论

提出了基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔结构。在此种结构的基础上,推导了谐振腔的归一化传递函数,归一化传递函数具有和采用一般光纤耦合器的 FRR 相同的公式。仿真了谐振腔的主要特性参数,仿真结果表明在 $R_b = 0.9, \alpha_c = 0.1, \Delta\omega = 30 \text{ kHz}$ 时所设计的陀螺的极限灵敏度可达 $0.032 (^{\circ})/h$ 。实际制作了此种结构的谐振腔并进行了实验测试,结果表明耦合损耗偏大。在优化设计后,陀螺的极限灵敏度为 $0.15 (^{\circ})/h$ 。仿真结果对于实际制作基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔具有指导意义。通过实际制作基于微光学结构的 HC-PBF 环形谐振腔样品验证了此种结构的可行性,为未来进一步研究基于微光学结构的谐振式空芯光子带隙光纤陀螺提供了理论和实验依据。

参 考 文 献

- 1 H. C. Lefèvre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl.. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
H. C. Lefèvre. 光纤陀螺仪 [M]. 张桂才,王巍译.北京:国防工业出版社,2002
- 2 N. Barbour. Inertial components: past, present and future [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2001
- 3 S. P. Divakaruni, S. J. Sanders. Fiber-optic gyros: a compelling choice for high precision applications [C]. 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006
- 4 Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min *et al.*. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 430~435
于秀娟,廖延彪,张敏等.谐振式空芯光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 430~435
- 5 Kang Chong, Liu Furong, Huang Zongjun *et al.*. The influence of spectrum width of optical source on the sensitivity of Fabry-

- Perot optical fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 337~340
- 康 崇, 刘芙蓉, 黄宗军 等. 光源谱宽对法布里-珀罗干涉仪光纤传感器工作灵敏度的影响 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 337~340
- 6 Yu Huaiyong, Zhang Chunxi, Feng Lishuang *et al.*. Research on Kerr-effect-induced noise of intergrated optical gyroscope based on silicon on SiO₂ waveguide resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1013003
- 于怀勇, 张春熹, 冯丽爽 等. 谐振式硅基二氧化硅集成光学陀螺的克尔噪声研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1013003
- 7 Zhang Xulin, Xu Pin. Investigation of back-reflection of ring resonator in resonator optic gyro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2302~2307
- 张旭琳, 徐 平. 谐振式光学陀螺环形谐振腔内背向反射研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2302~2307
- 8 A. S. Glen, K. S. Lee, T. Q. Qiu. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing [C]. *Optical Fiber Sensors*, OSA Technical Digest (CD), 2006, ME6
- 9 H. K. Kim, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino. Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(8): 3169~3174
- 10 X. L. Zhang, W. Jin, D. Q. Ying. Performance analysis of an optical passive ring-resonator gyro with a hollow-core photonic bandgap fiber sensing coil [C]. *SPIE*, 2010, **7853**: 785324
- 11 Feng Lishuang, Xing Jiwu, Yu Huaiyong *et al.*. Resonator design for photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1136~1140
- 冯丽爽, 邢济武, 于怀勇 等. 光子晶体光纤陀螺的谐振腔设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1136~1140
- 12 Wei Bo, Yang Yuanhong, Duan Weiqian. Coupling module design for air-core PCF R-FOG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(Suppl.): 313~316
- 魏 博, 杨远洪, 段玮倩. 空芯光子晶体光纤谐振腔耦合模块的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(增刊): 313~316
- 13 T. Dang, G. A. Sanders, T. Spicer *et al.*. Micro-Optics Photonic Bandgap Fiber Coupler [P]. US Patent 7,680,372 B2, 2010-03-16
- 14 Bi Weihong. Mathematical models for fiber optical Fabry-Perot interferometric cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8): 744~747
- 毕卫红. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型 [J]. *光子学报*, 1999, **28**(8): 744~747
- 15 Yao Qiong, Song Zhangqi, Xie Yuanping *et al.*. Study on the characteristics of fiber optic resonator ring for resonator fiber optic gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 676~680
- 姚 琼, 宋章启, 谢元平等. 谐振腔光纤陀螺光纤谐振环特性研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(4): 676~680
- 16 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 731~734
- 马慧莲, 金仲和, 丁 纯 等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 731~734
- 17 J. T. Kristensen, A. Houmann, X. Liu *et al.*. Low-loss polarization-maintaining fusion splicing of single-mode fibers and hollow-core photonic crystal fibers, relevant for monolithic fiber laser pulse compression [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9986~9995

栏目编辑: 王晓琰