

## 高精度环形谐振腔的结构设计及优化

刘耀英<sup>1</sup>, 薛晨阳<sup>1,2</sup>, 郑 华<sup>1</sup>, 安盼龙<sup>1</sup>, 崔晓文<sup>1</sup>, 卢晓云<sup>1</sup>, 刘 俊<sup>1,2</sup>

- (1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘 要:** 环形谐振器作为谐振式光学陀螺的核心敏感部件, 其精细度的大小直接影响光纤陀螺的灵敏度, 所以研究光纤环形谐振器的特性及其精细度是优化陀螺设计和制造及提高性能的关键。通过对分析不同耦合器结构的耦合原理, 系统分析了在一定激光器线宽的基础上, 谐振式光学陀螺系统灵敏度和谐振腔光路中各参数的间的关系及耦合器耦合系数与各损耗参数间的关系。设计优化 R-MOG 系统的主要参数。最终在同时考虑到谐振腔的高精细度和高 Q 值得前提下, 得到当腔长尺寸为 21.4 cm 时, 精细度达 170, Q 值为  $3.34 \times 10^7$ , 此时, 灵敏度为  $0.48 (^{\circ})/h$ , 并且, 通过建立一个 R-MOG 闭环实验系统, 对系统双路转动的闭环响应进行了测试, 这为陀螺系统的构建提供了理论和实验基础。

**关键词:** 谐振器; 光纤陀螺; 耦合器; 精细度; 灵敏度

**中图分类号:** TN252    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3688-06

## Structure design and optimization of high fineness ring resonator

Liu Yaoying<sup>1</sup>, Xue Chenyang<sup>1,2</sup>, Zheng Hua<sup>1</sup>, An Panlong<sup>1</sup>, Cui Xiaowen<sup>1</sup>, Lu Xiaoyun<sup>1</sup>, Liu Jun<sup>1,2</sup>

- (1. Ministry of Education, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Resonator is the core sensing element of resonant optical gyroscope, its fineness is an important parameter of gyroscope. Fineness  $F$  directly affects the size of the sensitivity of fiber-optic gyroscope (FOG), so research on the characteristics of optical fiber ring resonator and its fineness is the key to optimize the design, manufacture and improve its performance. In this paper, the working principle of ring resonator was introduced in detail, including the coupling principle of the coupler structure and the transmission mode of light in resonator. Each influenced parameters of sensitivity and some parameters between coupling coefficient and loss were analyzed. Finally by considering the resonator of high precision and high  $Q$ , when the cavity size is 21.4 cm, the fineness can reach 170, the  $Q$  value can reach  $3.34 \times 10^7$ , and at this point, the sensitivity is  $0.48 (^{\circ})/h$ . Moreover, the R-MOG closed loop experiment system was established and closed-loop response of a two-way rotation system was tested, which provides theoretical and experimental basis for the construction of gyro system.

**Key words:** resonator; fiber gyroscope; coupler; fineness; sensitivity

收稿日期: 2014-03-11; 修订日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(91123036, 51225504)

作者简介: 刘耀英(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光纤陀螺、光学谐振腔方面的研究。Email: liuyy0300@163.com

导师简介: 薛晨阳(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事传感器技术、微纳器件与系统方面的研究。

Email: xuchenyang@nuc.edu.cn

## 0 引言

谐振式光学陀螺(Resonator Optic Gyroscope, ROG)是基于光学 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度的一种新型光学传感器<sup>[1-3]</sup>。与目前技术成熟的干涉式光学陀螺相比,其光纤长度短,降低了由于光纤环中温度分布不均匀而引起的漂移;采用了高相干光源(即窄线宽激光器),波长稳定性高;因谐振频差与旋转角速率成正比,所以检测精度高、动态范围大<sup>[4]</sup>。而且具有理论精度高,可集成化、微型化等特点<sup>[5]</sup>。因此,利用半导体技术制作集成微光学环形谐振腔,实现集成化的谐振式微光学陀螺(Resonator Micro-Optic Gyro, R-MOG)<sup>[6]</sup>,是 ROG 的发展趋势之一。对于 R-MOG,其之所以能够在短腔长的条件下达到较高的分辨率,正是由于环形谐振腔具有高精度度(F)。

早在 1982 年,美国斯坦福大学的 L.F.Stokes<sup>[7]</sup>等人就在研究单模光纤环形谐振腔中提到陀螺精细度等的相关知识,但都没有系统地分析影响陀螺灵敏度的各参数的关系,文中是利用光场叠加原理得到的环形谐振腔传递函数,对比分析了不同耦合器结构的耦合原理,并在一定激光器线宽条件下,优化设计了达到最佳灵敏度的系统结构参数。

## 1 理论分析

### 1.1 光纤环形谐振器的特性

由于谐振式微光学陀螺就是利用谐振腔的谐振峰变化来测量旋转角速度,所以要求谐振峰曲线在工作点附近越陡越好,即精细度 F 越大越好。当系统工作波长,光探测器和光路面积选定之后,则精细度 F 是影响谐振式光纤陀螺灵敏度的重要参数。

通常光纤陀螺的灵敏度表达式为<sup>[8-9]</sup>:

$$\delta\Omega = \frac{3\sqrt{3}\pi}{4} \cdot \frac{Nc\lambda}{F\rho L^2} \sqrt{(1-\sqrt{2/3}\rho)} \frac{h\omega}{\eta_{pd}I_0} B \quad (1)$$

$$\delta\Omega = \frac{1}{dQ\sqrt{P_{pd}}} \cdot \sqrt{\frac{2hc^3}{\tau\lambda\eta_{pd}}} \quad (2)$$

式中:d 为环形谐振腔的直径;L 为光纤环形谐振器的环路周长;λ 为工作波长;P<sub>pd</sub> 为光探测器接收到的功率,为单位时间打到探测器上的光子数 N<sub>0</sub> 与每个光子的能量 hv 的乘积;η<sub>pd</sub> 为光探测器的量子效率,

即在某一特定的波长,每秒钟内产生的光电子数 N<sub>1</sub> 与入射光量子数 N<sub>0</sub> 之比;τ 为积分时间;ρ 为谐振腔的谐振深度。由公式(1)和(2)可以看出,灵敏度既与 F 有关又与 Q 有关,因此,要保证谐振式光纤陀螺有最佳灵敏度,设计上需同时考虑 Q 值和 F 值对灵敏度的影响。

### 1.2 耦合器设计

在谐振式光学陀螺中,环形谐振腔是其基本结构单元,而对于环形谐振腔而言,耦合器又是其关键部件。光纤耦合器是利用光纤中光波的消逝场耦合现象使两个相邻的纤芯之间的光能量发生耦合,从而实现全光纤的分光和合光。通常,根据光纤环绕制的不同,耦合器设计有两种基本类型:定向耦合式耦合器、交叉式耦合器<sup>[10]</sup>。

#### (1) 定向耦合式耦合器

定向耦合式耦合器是将两根光纤 L1 和 L2 分别插入端口 P1 和 P2, L1 环绕成环 1, L2 从端口 P3 伸出,在如下图所示耦合区实现光的耦合。定向耦合式环形谐振腔结构示意图如图 1 所示。

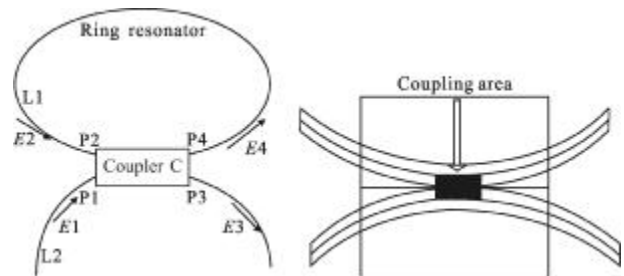


图 1 定向耦合式环形谐振腔示意图

Fig.1 Schematic of directional coupled ring resonator

定向耦合式光纤环形谐振器的原理:F1 和 F2 为两段入口光纤,C 为耦合器,LPM 为光纤环。P<sub>i</sub> 为定向耦合器的端口。E<sub>i</sub> 为光通过耦合器各个端口的电场幅值。光由 P1 端入射,部分光通过耦合器的 P3 端透射出来,绝大部分光通过 P4 端口耦合进入环形谐振腔,形成一个闭合的谐振回路。耦合器 C 的主要性能参数为插入损耗,插入损耗是指某一输出端口的光功率相对全部输入光功率的减少值,其数学表达式为:

$$\gamma_i = -10\lg(P_{outi}/P_{in}) \quad (3)$$

式中:γ<sub>i</sub> 是第 i 个输出端口的插入损耗;P<sub>outi</sub> 是第 i 个输出端口测到的光功率值;P<sub>in</sub> 是输入端的光功率

值。当光纤环持续谐振建立以后,定向耦合器 C 的作用就是不长由于耦合插入损耗、光纤传输损耗及熔接光纤两段接口的能量的损失。根据光的模式耦合理论可得到耦合器 C 耦合端口和透射端口输出的电场的幅值分别为:

$$E_3 = \sqrt{(1-\gamma_0)} [\sqrt{1-k} E_1 + j\sqrt{k} E_2] \quad (4)$$

$$E_4 = \sqrt{(1-\gamma_0)} [\sqrt{1-k} E_2 + j\sqrt{k} E_1] \quad (5)$$

光在环形谐振腔内传输一周,由于传输损耗,  $E_2$  和  $E_4$  之间存在这样的关系:

$$E_2 = e^{-\alpha_0 L} e^{j\beta L} E_4 \quad (6)$$

式中:  $k$  为耦合器的耦合系数;  $\gamma_0$  为耦合器的插入损耗;  $\alpha_0$  为光纤环形谐振腔的单位长度的传输损耗;  $\beta$  为光学传播常数;  $L$  为腔长。

所以,若达到最佳谐振条件: 端口 P3 端透射出的能量为 0, 联立上述三式可得:

$$\beta L = m2\pi \quad (7)$$

$$k = 1 - (1-\gamma_0)e^{-2\alpha_0 L} \quad (8)$$

通常,耦合器的插入损耗  $\gamma_0$ , 被定义为:

$$1 - \gamma_0 = \frac{|E_3|^2 + |E_4|^2}{|E_1|^2 + |E_2|^2} \quad (9)$$

由公式(4)~(6)可得,透射端和耦合端的幅值分别为:

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \frac{2(1-\gamma_0)(1-k_r)(1-\cos\beta L)}{1+(1-k_r)^2-2(1-k_r)\cos\beta L} \quad (10)$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = \frac{(1-\gamma_0)k_r}{1+(1-k_r)^2-2(1-k_r)\cos\beta L} \quad (11)$$

### (2) 交叉式耦合器

这种由单模光纤环绕而成的光学谐振腔(见图2),从端口P1进入的光,大部分耦合进入端口P4,直接透射到端口P3的光,进入端口P2在耦合到P3继续循环,形成闭合的谐振回路。从端口P1和端口P2进入端口P3的光,产生相长干涉;从端口P1和端口P2进入端口P4的光产生相消干涉,理论上进入端口P4的两束

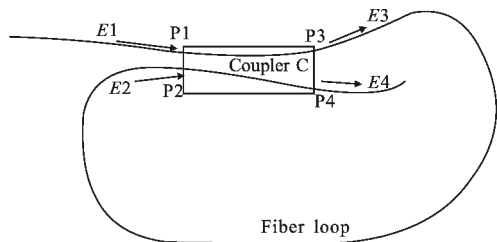


图 2 交叉耦合式环形谐振腔示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross coupled ring resonator

发生相消干涉的光在振幅上相等且完全抵消。从能量守恒的角度来说,在环内传输的光会一直循环到环的损耗等于从端口 P1 输入的功率。

$$E_3 = \sqrt{(1-\gamma_0)} [\sqrt{1-k} E_1 + j\sqrt{k} E_2] \quad (12)$$

$$E_4 = \sqrt{(1-\gamma_0)} [\sqrt{1-k} E_2 + j\sqrt{k} E_1] \quad (13)$$

$$E_2 = e^{-\alpha_0 L} e^{j\beta L} E_3 \quad (14)$$

同理,在交叉式光纤环形谐振腔里,若要达到最佳谐振条件,从 P4 端口透射出的能量为 0,则由上式可得:

$$\beta L = m2\pi - \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

$$k = 1 - (1-\gamma_0)e^{-2\alpha_0 L} \quad (16)$$

所以透射端和耦合端的幅值分别为:

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \frac{(1-\gamma_0)(1-k)}{(1+k)^2 - 4k\sin^2\left(\frac{\beta L}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (17)$$

$$\left| \frac{E_4}{E_1} \right|^2 = (1-\gamma_0) \left[ 1 - \frac{(1-\gamma_0)k}{(1+k)^2 - 4k\sin^2\left(\frac{\beta L}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} \right] \quad (18)$$

由上面的分析可知,耦合器的不同设计方法并不会影响耦合系数及光纤环形腔的光传输模式。只是在达到最佳谐振条件下的耦合器的耦合系数表达式不同。因此,在下面的仿真分析中,以定向耦合式耦合器为基础,系统地分析系统的各损耗与耦合系数、精细度、Q 值及陀螺灵敏度的关系。

## 2 仿真分析及结构设计

环形谐振腔是谐振式光纤陀螺的核心部件,当陀螺转动时,光纤环形谐振腔中心频带分裂, CW、CCW 本征模的谐振曲线会有一定的谱线宽度,常用半高全宽 FWHM 来表示,称之为谐振腔本征谱线宽度。而精细度(又称清晰度),作为陀螺性能的一个重要参数,是衡量谐振腔对光频率敏感程度的物理量,被用来表示结构干涉光模态的有效个数,表征本征谱线宽度,定义为自由频谱范围与半高全宽的比值。精细度  $F$  的大小直接影响光纤陀螺的灵敏度。精细度主要取决于光路损耗。光路损耗包括耦合器输出损耗和全部波导损耗,即吸收与散射、加工缺陷及弯曲度等引起的损耗,  $F$  的数学表达式如下<sup>[11-13]</sup>:

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (19)$$

式中:自由频谱范围 FSR 为相邻两个谐振波长(峰)之间的距离;半高全宽 FWHM 为在谐振峰的两侧输

出功率为峰值功率一半时的两束光波的波长差。其数学表达式为:

$$FSR = \frac{c}{nL} \tag{20}$$

$$FWHM = \frac{2c}{\pi nL} \cdot \arcsin\left(\frac{k}{2\sqrt{1-k}}\right) \tag{21}$$

因此精细度

$$F = \frac{\pi}{2\arcsin\left(\frac{k}{2\sqrt{1-k}}\right)} \tag{22}$$

图 3 所示为精细度 F 与耦合系数 k 的关系图。

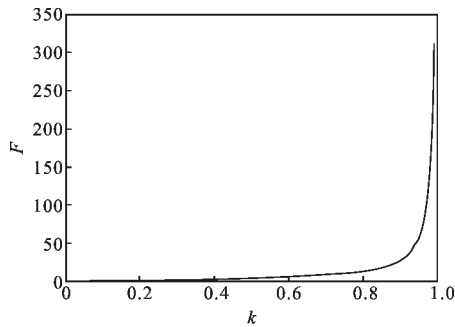


图 3 精细度 F 与耦合系数 k 的关系

Fig.3 Relation of F versus k

由图 3 可得,随着 k 的增加,精细度随之升高,又由公式(8)可得,耦合器的耦合系数与插入损耗和单位长度的传输损耗有关,因此首先对不同插入损耗  $\gamma_0$ 、不同单位长度的传输损耗  $\alpha_0$  时 F 的变化关系进行了分析,结果如图 4~5 所示。

由图 4 和图 5 可得,随着  $\gamma_0$  和  $\alpha_0$  的增加,精细度都相应降低,这是因为随着损耗的增大,耦合进入环形谐振腔光越少,耦合效率越低,精细度就随之降低。根据公式(20)可以看出,半高全宽与腔长 L 和耦合系数 k 都有关系,下面分别对腔长和耦合系数对半高全宽的影响进行了分析,如图 6~8 所示。

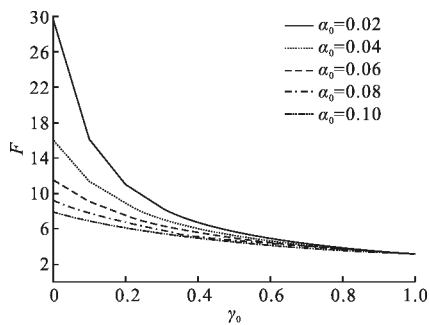


图 4 不同  $\alpha_0$  下, F 随  $\gamma_0$  的变化关系图

Fig.4 Relation of F versus  $\gamma_0$

由半高全宽 FWHM 与耦合系数 k 及腔长 L 的关系图可得:随着腔长 L 的增加,FWHM 呈现先减小

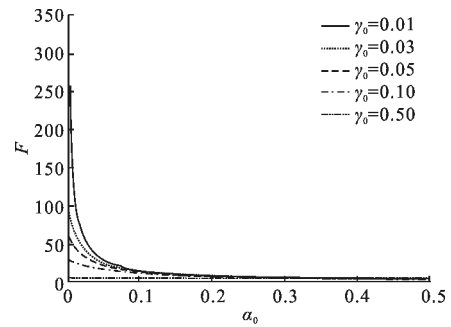


图 5 不同  $\gamma_0$  下, F 随  $\alpha_0$  的变化关系图

Fig.5 Relation of F versus  $\alpha_0$

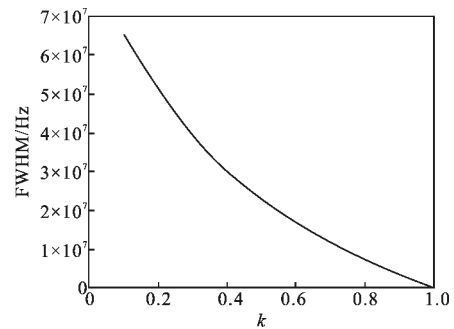


图 6 半高全宽 FWHM 随耦合系数 k 的变化关系图

Fig.6 Relation of FWHM versus k

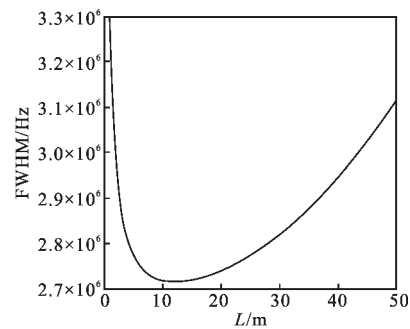


图 7 半高全宽 FWHM 随腔长 L 的变化关系图

Fig.7 Relation of FWHM versus L

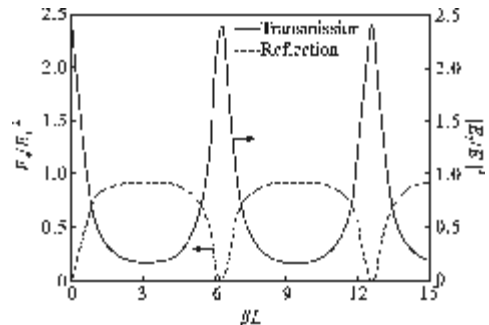


图 8 L=13m 时谐振腔的透射谱线及反射曲线

Fig.8 Transmission and reflection curves of resonator

for L=13 m

后增大的趋势。当 L=13m 时,FWHM 最小,为 2.72MHz,因此,根据图 4 和图 5 的仿真结果可得,取  $\alpha_0=0.02$ ,



$\gamma_0=0.01, L=13\text{ m}$  时谐振腔的  $Q$  值为  $7.12\times 10^7$ , 而此时精细度只有 5.8, 不满足陀螺的高精度要求, 因此, 为了同时满足高  $F$  和高  $Q$ , 文中做了以下的分析, 即  $F$  与  $L$  的变化关系,  $Q$  与  $L$  的变化关系以及  $FL^2$  与  $dQ$  随  $L$  的变化趋势, 结果分别如图 9~10 所示。

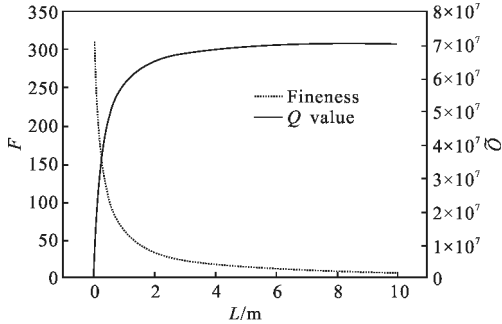


图 9 F 与 Q 随 L 的变化关系

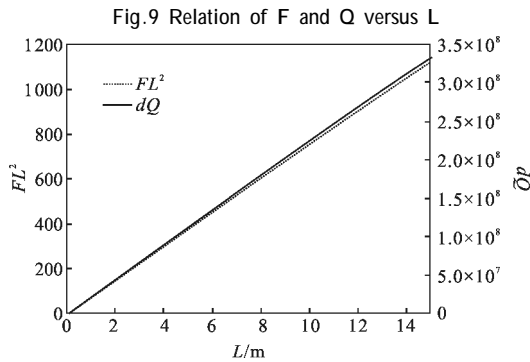


图 10  $FL^2$  与  $dQ$  随 L 的变化关系

由图 9 和图 10 可得, 随着  $L$  的增加,  $Q$  值逐渐增大,  $F$  逐渐减小, 但  $FL^2$  与  $dQ$  的整体乘积是随着  $L$  的增加而增加的。由公式(1)和(2)可得, 陀螺的灵敏度都随之提高。所以, 要想获得高灵敏度, 需要同时有高的  $F$  值和  $Q$  值, 因此, 当  $L=0.214\text{ m}$ , 此时,  $F=170, Q=3.34\times 10^7$ , 陀螺的灵敏度为  $0.98\text{ (}^\circ\text{)/h}$ , 同时满足了高  $F$ 、高  $Q$ 、高灵敏度。图 11 为  $L=0.214\text{ m}$  时谐

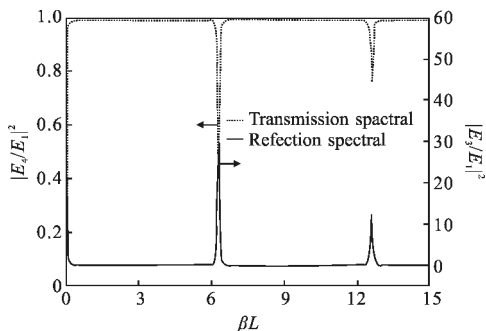


图 11  $L=0.214\text{ m}$  时谐振腔的透射谱线及反射曲线  
Fig.11 Transmission and reflection curves of resonator for  $L=0.214\text{ m}$

振腔的透射谱线及反射曲线图。

### 3 实验测试

在理论基础和仿真分析的基础上, 文中搭建了陀螺双路转动实验平台, 并进行了相应的测试。从激光器发出的光, 经隔离器 ISO 在通过分束器 C1 分束, 两束光再分别经隔离器 ISO2 和 ISO3 进入相位调制器 PM1 和 PM2, 再通过环形器 C2 和 C3 分别进入光纤环内形成顺、逆时针两束光, 经过 C2 进入环内的逆时针光束在环形谐振腔内循环出来进入 C3, 被探测器检测 PD2 到, 在经过锁相放大器 LIA2 进入 PI 电路高压放大器, 从而有激光器锁定谐振腔的频率, 同理顺时针光束循环输出到 PD1, LIA1, 当腔旋转时, 由于 CCW 锁定, 则在端口 1 获得的信号即为陀螺信号, 即频差信号。相应的实验方案图如图 12 所示, 实验测试曲线如图 13 所示。

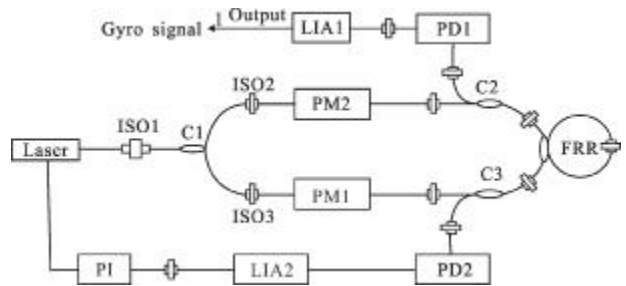


图 12 实验方案图

Fig.12 Experimental scheme

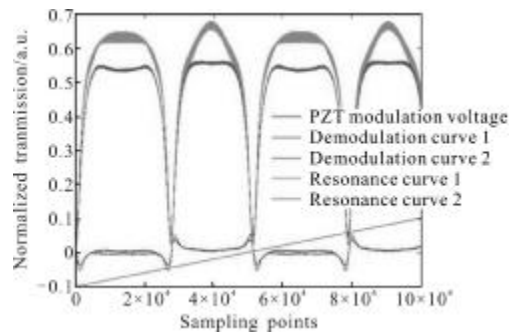


图 13 实验测试所得的曲线图

Fig.13 Curves of experimental tests

### 4 结论

文中详细介绍了光纤陀螺的性能指标, 通过对分析环形谐振腔不同耦合器结构的耦合原理, 系统分析了谐振式光学陀螺系统灵敏度和谐振腔光路

中各参数的间的关系及耦合器耦合系数与各损耗参数间的关系,设计优化了 R-MOG 系统的主要参数。最终在同时考虑到谐振腔的高精细度和高 Q 值得前提下,得到当腔长尺寸为 21.4 cm 时,精细度达 170, Q 值为  $3.34 \times 10^7$ , 此时,灵敏度为  $0.48 (^{\circ})/h$ , 并通过建立 R-MOG 闭环实验系统,对系统双路转动的闭环响应进行了测试,为陀螺系统的构建提供了理论和实验基础。

#### 参考文献:

- [1] Suzuki K, Takiguchi K, Hotate K. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar light wave circuit [J]. *Light Wave Technology*, 2000, 18: 66-72.
- [2] Ma H, Zhang X, Jin Z, et al. Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique[J]. *Opt Eng*, 2006, 45: 1-5.
- [3] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(5): 1099-1100.
- [4] Ma H, He Z, Hotate K. Reduction of backscattering induced noise by carrier suppression in waveguide-type optical ring resonator gyro[J]. *Light Wave Technology*, 2011, 29: 85-90.
- [5] Hotatek. Fiber sensor technology today [J]. *Optical Fiber Technology*, 1997, 3(4): 356-402.
- [6] Suzuki K, Takiguchik K, Hotatek K. Monolithically integrated resonator micro optic gyro on silica planar light wavecircuit [J]. *Light Wave Technology*, 2000, 18(1): 66-72.
- [7] Loren F Stokes, Marvin Chodorow, Herbert J Shaw. Sensitive All-single-mode-fiber resonant ring interferometer [J]. *Journal of Light Wave Technology*, 1983, 1(1): 288-290.
- [8] Wang Kunbo, Feng Lishuang, Wang Junjie. Alternative method for design and optimization of the ring resonator used in micro-optical gyro [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(7): 1481-1486. (in Chinese)
- [9] Francesco Dell'olio, Caterina Ciminelli. Theretical investigation of indium phosphide buried ring resonators for new angular velocity sensors [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 1-7.
- [10] Caterina Ciminelli, Francesco Dell'Olio, Mario N Armenise, et al. High performance InP ring resonator for new generation monolithically integrated optical gyroscopes [J]. *Optics Express*, 2013, 21: 556-563.
- [11] Hansuek Lee, Tong Chen, Jiang Li, et al. Chemically etched ultrahigh-Q wedge-resonator on a silicon chip [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 369-373.
- [12] Pascal Del'Haye, Scott A Diddams, Scott B Papp. Laser-machined ultra-high-Q microrod resonators for nonlinear optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102: 221119.
- [13] Yoshihiro Ohtsuka. Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light-source coherence[J]. *Journal of Light Wave Technology*, 1985, 3(2): 378-384.