文章编号: 1001-3806(2010)01-0026-04

集成光学陀螺谐振腔结构参量的确定

王马华[1,2], 朱光平[1,3], 崔一平[1*], 张　彤[1]
(1. 东南大学 先进光子学中心, 南京 210096; 2. 淮阴工学院 电子信息工程系, 淮安 223003; 3. 淮北师范学院 物理与电子信息工程学院, 淮北 235000)

摘要: 为了研究集成光学陀螺灵敏度的优化, 采用调频光谱原理与多光束干涉方法, 对谐振式集成光学陀螺核心敏感器件的谐振特性、决定因素及其它们对陀螺灵敏度的影响进行了研究, 得到了与光纤谐振腔情形不同, 耦合比与腔长变化对谐振特性影响具有二重性的结果。结果表明, 在给定波导传输损耗的条件下, 以陀螺灵敏度为判据, 集成光学陀螺存在由波导损耗水平决定的最佳谐振腔结构参量。

关键词: 集成光学; 最佳参量; 多光束干涉; 谐振式光学陀螺
中图分类号: V241.5+9　　**文献标识码**: A　　**doi**: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.008

Determination of the ring resonator's parameters in integrated optics gyroscopes

WANG Ma-hua[1,2], *ZHU Guang-ping*[1,3], *CUI Yi-ping*[1], *ZHANG Tong*[1]
(1. Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Electronics and Information, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China; 3. Physics Electronic Information Engineering School, Huaibei Normal College, Huaibei 235000, China)

Abstract: In order to optimize the performance of an integrated optics gyroscope (IOG), effect on the gyroscope sensitivity resulting from resonant characteristics and structural parameters of a passive ring resonator (PRR), a gyroscope's critical component, was studied based on frequency modulation spectroscopy theory and multi-beams interference method. Because of much more serious light attenuation in waveguides than that in fibers, there were bidirectional function in the design of an IOG while PRR's cavity length and coupling coefficient were changed, being distinguished with the situation in fiber-optic gyroscopes. Finally, a conclusion was drawn that there were optimum parameters determined by the attenuation in waveguides.

Key words: integrated optics; optimum parameters; multi-beams interference; resonator optics gyroscope

引　言

借鉴集成电路技术, 在平面光波导上"蚀刻"出若干光电功能器件构成集成光学陀螺(integrated optic gyroscope, IOG)系统, 是目前光学陀螺研究热点之一。通过双光束补偿调频光谱测量原理的应用, 无源谐振式结构成为目前集成光学陀螺最优结构。对该结构和进一步研究表明, 谐振式光学陀螺(resonant optic gyroscope, ROG)理论上灵敏度优势的实际实现, 取决于陀螺系统各组成器件的性能[1-5]。

光源、电光调制器等器件的性能, 如光源谱宽、调制器复位精度等, 对陀螺性能的影响已得到了广泛的重视与深入的研究[6-7]。但是, 作为谐振式光学陀螺核心敏感器件, 光学无源环形谐振腔(passive ring resonator, PRR)性能对陀螺灵敏度的影响, 尚未得到应有的重视。

目前, 可应用于集成光学器件的无机或有机聚合物波导, 其传输损耗水平约在0.05dB/cm~0.3dB/cm, 而且, 从发展趋势看, 无论是通过基础材料选择或工艺革新, 降低这种传输损耗有很大难度。虽然, 与普通单模光纤的损耗水平相比亦有云泥之别, 对波导PRR的谐振特性以及陀螺可实现灵敏度有着不良影响, 成为集成光学陀螺发展主要制约因素, 但是, 在体积、重量和耐加速度冲击等性能上的优势, 集成光学陀螺在卫星调姿、导弹控制等应用领域, 有着相当迫切的应用需求与广泛的潜在应用前景。于是, 如何在现有波导损耗水平下, 通过PRR结构优化提高陀螺灵敏度, 已成为近年来集成光学陀螺研究主要方向之一[1,4]。

作者根据调频光谱原理与多光束干涉理论, 对PRR谐振特性与陀螺灵敏度间关系及谐振特性的决

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0465)
作者简介: 王马华(1966-), 男, 博士研究生, 主要从事工程光学与信息理论等方面的研究。
* 通讯联系人。E-mail: cyp@seu.edu.cn
收稿日期: 2008-11-12; 收到修改稿日期: 2009-04-15

定因素进行分析与研究，以灵敏度为判据，围绕 PRR 结构设计中参量选择问题进行相关工作，通过对结构参量决定因素与选择的研究，为优化陀螺灵敏度做出有益的尝试。

1　灵敏度的决定

图 1 为闭环谐振式光学陀螺结构的原理示意图。

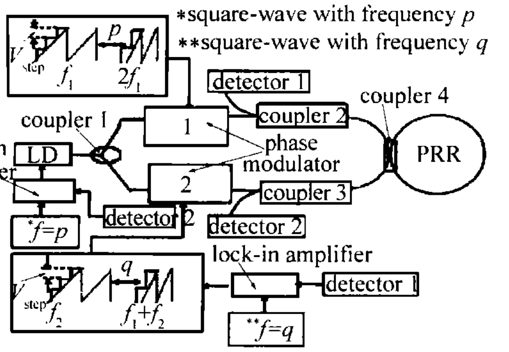

Fig. 1　Schematic diagram of polymer-IOG

由调频光谱原理可知：该结构下，陀螺相当于通过顺时针（clockwise，CW）、反时针（counter-clockwise，CCW）光，对 PRR 的吸收谱进行双光束补偿测量的调频光谱仪；在调频光激励下，反射式 PRR 相当于谐振特性已知的洛伦兹型吸收介质，谐振中心相当于介质吸收峰；通过负反馈机制对光源中心频率与可变调制频率的控制，实现对因 Sagnac 频移引致的“吸收峰”变化的锁定，实现高精度、大范围和良好线性度的频移测量，进而实现转动角速度测量。理论分析与实验研究表明，给定 PRR“吸收特性”后，该结构可实现受限于光电探测器量子噪声极限灵敏度[8]。

陀螺灵敏度，一般定义为单位萨格拉克频移对应光电流变化。设光源输出光强为 I_0，调制频率选择为由 PRR 谐振特性曲线的半峰全宽（full width at half maximum，FWHM）决定的最佳调制频率，则理论上陀螺可实现的最佳灵敏度为[9]：

$$K = \left.\frac{I_{D_1}}{\Delta f}\right|_{\Delta f \to 0} = \frac{3\sqrt{3}}{4}(1 - \alpha_c) I_0 \frac{\rho}{\Gamma} \qquad (1)$$

式中，I_{D_1} 为光电探测器 1 输出光电流；Δf 为萨格拉克频移变化量；α_c 为耦合器插入损耗；ρ 为谐振深度，随耦合比变化其取值范围为 $0 < \rho \leqslant 1$；2Γ 为 PRR 谐振特性曲线的半峰全宽。

图 2 所示是反射式 PRR 结构原理图，$E_1 \sim E_4$ 分别表示单色线性偏振的输入激励光、腔内传输光、耦合器中交叉耦合光与输出光。根据多光束干涉理论，采取类似于对法布里-珀罗腔的分析，设 ν，ν_0 分别为 PRR 中激励光频率和谐振中心频率，n 为组成波导的等效折射率。在近谐振条件下，PRR 的“吸收谱”为[3-4,6]：

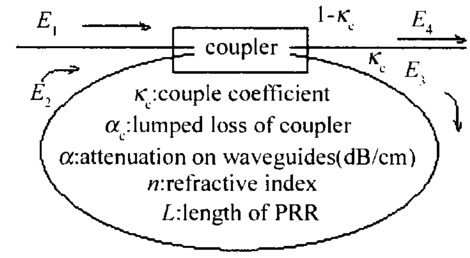

Fig. 2　Schematic diagram of passive ring resonator

$$L(\nu - \nu_0) = \rho \cdot \frac{\Gamma^2}{(\nu - \nu_0)^2 + \Gamma^2} \qquad (2)$$

$$\Gamma = \frac{c}{2\pi n L} \cdot [(1 - Q)/\sqrt{Q}] \qquad (3)$$

$$\rho = 1 - \frac{1}{1 - \alpha_c}\left[T^2 - \frac{2TR}{1 - Q} + \frac{R^2}{1 - Q^2} \cdot \frac{1 + Q}{1 - Q}\right] \qquad (4)$$

式中，

$$T = \sqrt{1 - \kappa_c}\sqrt{1 - \alpha_c} \qquad (5)$$

$$R = \kappa_c(1 - \alpha_c)\sqrt{1 - \alpha} \qquad (6)$$

$$Q = \sqrt{1 - \alpha}\sqrt{1 - \kappa_c}\sqrt{1 - \alpha_c} \qquad (7)$$

分别为谐振腔的透射系数、反射系数和品质因素，而 α，κ_c 和 L 表示波导传输损耗、谐振腔组成耦合器的耦合比与组成波导腔长。

结合(1)式、(3)式和(7)式，除光源光强外，陀螺灵敏度决定于 Γ 和 ρ，在谐振或近谐振条件下，陀螺灵敏度与 PRR 线宽成反比。

2　PRR 结构参量确定

2.1　腔长与灵敏度

与 F-P 腔相似，PRR 谐振时，谐振条件要求的耦合比 κ_r 应满足[10]：

$$\kappa_r = 1 - (1 - \alpha_c)\exp(-\alpha L) \qquad (8)$$

结合(3)式、(5)式、(6)式、(7)式及(8)式可知，给定 α 后，Γ 是 L 的函数。结合(3)式与(7)式：

$$\frac{d\Gamma}{dL} = \frac{c}{2\pi n} \times \left[\frac{\alpha}{4L\sqrt{Q}} - \frac{(4 + \alpha L Q + 2\sqrt{Q})}{4L^2\sqrt{Q}}\right] \qquad (9)$$

式中，c 为真空中的光速。

从(9)式右侧及各参量定义可知，当 α 具有较大值时，腔长增加既有利于压缩线宽，又因损耗增加而引致 PRR 谐振特性展宽。具体表现在 3 个方面：(1)通过光程增加，提高多光束干涉输出的相干性，压缩线宽；(2)腔内传播光信号的光强，按 $\exp(-\alpha L)$ 加速衰减，导致谱线展宽；(3)腔长增加，(8)式决定的谐振条件耦合比亦随之增加，相当于提高了谐振腔输出端的透射率，谱线展宽。三方面影响综合作用，使得线宽随 L 变化不再具有单调性，存在使线宽最值的腔长。为确定其值，令(9)式等于 0，有：

$$L\alpha = (4 + 2\sqrt{Q})/(1 - Q) \qquad (10)$$

其它条件不变，具有上式决定腔长时，陀螺因 PRR 线宽最小而具有最高的灵敏度，最佳腔长由此得名。

结合(8)式与(10)式，最佳腔长决定于波导损耗水平。

考虑光纤谐振腔情形，有 $\alpha \ll 1\mathrm{dB/cm}$，数十米数量级腔长变化可认为对腔内总损耗无关，由(8)式，$\kappa_c = 1-(1-\alpha_c)=\alpha_c$，亦与腔长无关，(9)式可改写为：

$$\frac{\mathrm{d}\Gamma}{\mathrm{d}L} = -\frac{c(1-Q)}{2\pi n\sqrt{Q}} \times \frac{1}{L^2} \tag{11}$$

根据(11)式中各参量之定义，其取值为负，表明增加腔长单调地压缩谱宽，有利于提高陀螺灵敏度。这表明，光纤陀螺中 PRR 结构参量选择是低损耗下腔长变化与腔内总损耗无关的特例，不具有普遍性。

2.2 耦合比与灵敏度

在光纤陀螺设计中，耦合比取由(8)式表示的谐振条件决定值[6-8]。但是，从灵敏度优化角度看，这不是最理想选择。

根据谐振实现过程，结合(4)式与(7)式，耦合比满足(8)式时 PRR 谐振，$\rho=1$，而 $\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}\kappa_c=0$。反之，PRR 则偏离谐振。但当 $\kappa_c<\kappa_r$ 时，$\rho<1$，$\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}\kappa_c>0$；$\kappa_c>\kappa_r$ 时，$\rho<1$，$\mathrm{d}\rho/\mathrm{d}\kappa_c<0$。

给定波导损耗水平并选择由(10)式决定的最佳腔长，PRR 中耦合器的耦合比在谐振条件附近有微小变化时，PRR 线宽与谐振深度均随之变化。由(3)式与(7)式，其变化规律满足：

$$\frac{\mathrm{d}\Gamma}{\mathrm{d}\kappa_c} = \frac{1}{4(1-\kappa_c)} \cdot \Gamma > 0 \tag{12}$$

即 Γ 是耦合比的单调增函数。

设 ρ'，Γ' 分别是 ρ，Γ 关于 κ_c 的 1 阶导数，由(1)式，当 κ_c 有 $\Delta\kappa_c$ 极小增量且满足：

$$\frac{\rho'}{\rho} \geqslant \frac{\Gamma'}{\Gamma} \tag{13}$$

时，增加 κ_c 始终有利于提高灵敏度；反之，灵敏度下降；等号成立时，灵敏度取极大值，相应的耦合比称为最佳耦合比，其值恒小于(8)式决定的谐振条件耦合比[4]。

2.3 实验与仿真验证

为验证上述分析结果，根据相关研究[3-4,9,11]，以包层修饰的光纤代替相应损耗水平波导组成 PRR，用相应的“光纤集成陀螺”模拟集成光学陀螺，结合 MATLAB 与 LABVIEW 软件，进行双频率组合调制闭环控制及测试过程的仿真，对不同损耗水平下 PRR 结构参量选择进行验证。相应的腔长与耦合比变化对陀螺灵敏度的影响，分别如图 3、图 4 和表 1 所示。

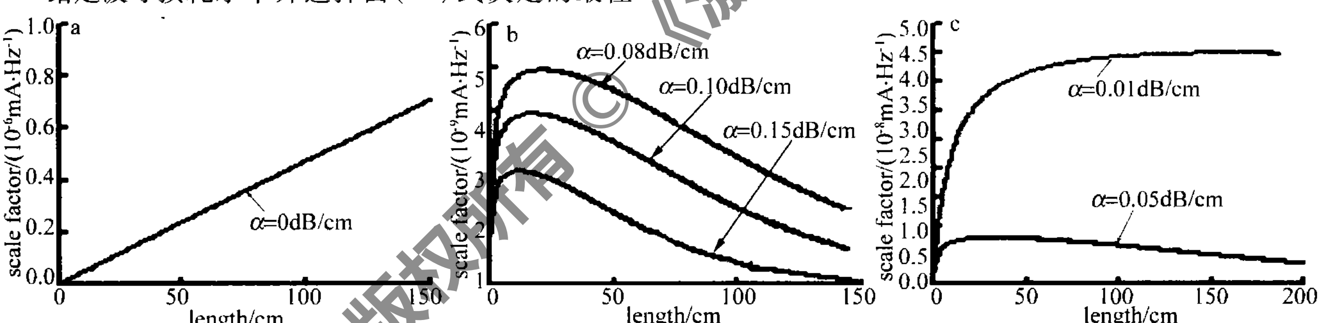

Fig. 3 Emulation diagram of scale factor as a function of length($\alpha_c=0.2\mathrm{dB}$)

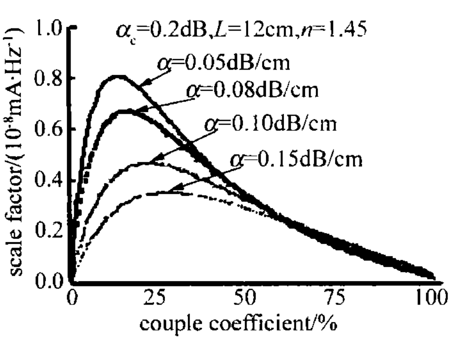

Fig. 4 Emulation results of the effect of κ_c on scale factor

Table 1 Emulation results of the effect of α on coupling coefficient

attenuation/(dB · cm⁻¹)	0.000001	0.05	0.08	0.10	0.15
coupling coefficient for resonance/%	5	17	24	28	38
optimum coupling coefficient for sensitivity/%	2.5	8.5	13	16	20

由图 3 可见，固定腔内总损耗时，与光纤陀螺情形相似，由于损耗不变，增加腔长总有利于提高陀螺灵敏度；而当波导损耗较高时，腔长对陀螺灵敏度的影响，具有明显的非单调性，拐点对应最佳腔长，并且随损耗增加而减小。由图 4 及表 1 可知，最佳耦合比总小于谐振条件耦合比，陀螺最佳灵敏度只能在近谐振下实现；两个耦合比值间的差，随波导损耗水平增加而增加，则表明按光纤陀螺情形选择耦合比时，将会由于偏离最佳值点而带来更严重的灵敏度损失。这与(1)式、(9)式和(13)式所示结论一致。

3 结 论

综上理论分析表明，在组成波导损耗水平给定后，

决定于 PRR 谐振特性的陀螺灵敏度,实际受制于谐振腔的结构参量,而结构参量最终决定于其组成波导的传输损耗。因此,在波导传输损耗较高情形下,集成光学陀螺结构几乎没有“设计”的余地,只能按其波导损耗水平决定的最佳参量进行系统组织。因为高损耗已经严重劣化了陀螺灵敏度,而任何偏离最佳参量的结构设计,只会使灵敏度进一步劣化,从而影响陀螺应用价值,甚至是陀螺效应能否观察都将成为问题。相关实验与仿真结果相对于理论分析结论的一致性表明,本文中所得结论对基于较高损耗波导的集成光学陀螺设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] TAN J R, LIU Y Zh, HUANG L. Development of fiber optic gyroscope [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 544-547 (in Chinese).

[2] LIU W J, LI H J, QU Sh L, *et al*. Femto-second laser pulse compression in external cavity [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 665-667 (in Chinese).

[3] WANG M H, CUI Y P, ZHANG T. Application of frequency-modulation spectroscopy in the optimization of integrated optics gyros [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(4): 464-468 (in Chinese).

[4] WANG M H, CUI Y P, ZHANG T. Investigation on the optimization for the couple coefficient of P-ROG [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (10): 1793-1796 (in Chinese).

[5] JIN Sh L, LONG X W, WANT F, *et al*. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 409-414 (in Chinese).

[6] MA H L, JIN Zh H, DING Ch, *et al*. Research on signal detection method of resonator fiber optic gyros [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(8): 1001-1005 (in Chinese).

[7] MA H L, JIN Zh H, DING Ch, *et al*. Influence of spectral line-width of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8): 731-734 (in Chinese).

[8] GEHRTZ M, BJORKLUND G C. Quantum-limited laser frequency-modulation spectroscopy [J]. J O S A, 1985, B2(9): 1510-1525.

[9] WANG M H, CUI Y P, ZHANG T. Investigation on the determination of the optimized modulation frequency for the R-IOG [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30(6): 2291-2293 (in Chinese).

[10] OHTSUKA Y. Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light-source coherence [J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, LT-3 (2): 378-384.

[11] TANG Q A, MA X Y. Experimental study on fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(4): 33-36 (in Chinese).

(上接第 7 页)

参 考 文 献

[1] XIE K L, RAO Y J, RAN Z L. Distributed optical fiber sending system based of Raleigh scattering light Φ-OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 569-572 (in Chinese).

[2] CHANG D I, GUY M J, CHERNIKOV S V, *et al*. Single-frequency erbium fiber laser using the twisted-mode technique [J]. Electron Lett, 1996, 32(19): 1786-1787.

[3] YANG X D, LI Sh H J, CAO X M, *et al*. Grating-feedback frequency-tuning extended-cavity laser diode [J]. Laser Technology, 2008, 32 (6): 645-648 (in Chinese).

[4] OU P, JIA Y D, ZHANG Ch X, *et al*. Narrow-linewidth single-frequency single-polarization Er-doped fiber ring laser [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(11): 1258-1261 (in Chinese).

[5] LOH H, SAMSON B N, DONG L, *et al*. High performance single frequency fiber grating-based erbium : ytterbium-codoped fiber lasers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(1): 114-118.

[6] FRISKEN S J. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. Opt Lett, 1992, 17(24): 1776-1778.

[7] HOROWITZ M, DAISY R, FISCHER B, *et al*. Narrow-linewidth, singlemode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. Electron Lett, 1994, 30(8): 648-649.

[8] ZHANG R J. Single frequency and single polarization fiber laser with narrow linewidth [D]. Hefei: Anhui University, 2007: 24-30 (in Chinese).

[9] JIA Y D, OU P, ZHANG Ch X, *et al*. Laser linewidth measurement error analysis and correction on fiber delayd self-heterodyne interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (s1): 65-68 (in Chinese).

[10] JIA Y D, OU P, YANG Y H, *et al*. Short fibre delayed heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 568-571 (in Chinese).