

文章编号: 0253-2239(2007)10-1793-4

聚合物集成光学陀螺最佳耦合系数的研究*

王马华^{1,2} 崔一平¹ 张彤¹

(¹ 东南大学先进光子学中心, 南京 210096)
(² 淮阴工学院电信系, 淮安 223001)

摘要: 无源环形谐振腔(Passive ring resonator, PRR)是谐振式光学陀螺(Resonator optic gyros, ROG)的核心敏感器件,其光学传递函数的半峰全宽是决定陀螺标度因子的重要因素之一。根据多光束干涉理论,耦合系数将通过反射式无源环形谐振腔的半峰全宽的作用而影响陀螺的标度因子。根据耦合模理论和调频检测原理,以标度因子最优为判据,推导了一般情形下耦合系数对标度因子的影响,论证了最佳耦合系数的存在与确定方法,并进行了仿真验证。结果表明,光纤陀螺中 5% 左右的最佳耦合系数取值不具有普遍意义,为较高波导传输损耗的聚合物集成光学陀螺结构优化提供一种新的思路。

关键词: 应用光学; 集成光学陀螺; 无源环形谐振腔; 耦合系数

中图分类号: V241.5⁺9 文献标识码: A

Investigation on the Optimization for the Coupling Coefficient of Polymer Integrated Optic Gyros

Wang Mahua^{1,2} Cui Yiping¹ Zhang Tong¹

(¹ Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096)
(² Department of Electronics and Information, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001)

Abstract: Passive ring resonator (PRR) is the critical sensing component of a resonator optic gyroscope (ROG) and the scale factor of a resonator optic gyroscope is mainly determined by the coupling coefficient through the full width at half maximum of the passive ring resonators transfer function. A method to determine the optimal value of coupling coefficient is elaborated based on the theory of coupled-mode theory and frequency-modulation (FM) spectroscopy. Finally, emulation results is given to verify the method and prove that the value of about 5% is only correct in the situation of fiber optic gyros (FOG).

Key words: applied optics; integrated optic gyro; passive ring resonator; coupling coefficient

1 引言

相对于其他结构的光学陀螺,由集成于同一平面波导上的微型化无源环形谐振腔(Passive ring resonator, PRR)、耦合器、电光调制器等功能元器件构成的集成光学陀螺(Integrated optic gyroscope, IOG),不仅具有微型化、重量轻和更耐加速度冲击等优点,而且因为微型化的无源环形谐振腔,克服了激光陀螺、光纤陀螺中,由于环形腔体积大而易受温度等环境因素影响、引进补偿机

制^[1~3]导致系统结构复杂等问题。因着聚合物材料优良的光电特性和良好的加工性,聚合物集成光学陀螺(Polymer integrated optic gyroscope, P-IOG)成为目前光学陀螺研究领域中的一个热点^[4]。

双频率组合调制负反馈闭环检测谐振式光学陀螺(Resonator optic gyros, ROG),是理论上可以实现光电探测器量子噪声极限灵敏度的最佳光学陀螺系统方案^[5],是聚合物集成光学陀螺研究中首选的系统结构。根据调频原理,谐振式光学陀螺实际实

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0465)和纵向项目(6906005001)资助课题。

作者简介: 王马华(1966—),男,江苏淮安人,博士研究生,主要从事聚合物无源光器件与聚合物集成光学陀螺工艺与结构方面的研究。E-mail: wmh0304@sina.com

导师简介: 崔一平(1957—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,主要从事非线性光学、物理电子学和工程光学等方面的研究。E-mail: cyp@seu.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-11-28

现的灵敏度主要取决于无源环形谐振腔的半峰全宽和谐振状态^[6~8]。聚合物波导一般有着较高的传输损耗^[4]。相应地,无源环形谐振腔也具有较大半峰全宽,从而降低陀螺系统的灵敏度。所以,在确定系统结构情形下,优化组成元件参量,提高系统灵敏度是聚合物集成光学陀螺研究重要方向之一。

根据多光束干涉理论,光源性能、腔长、材料折射率、波导传输损耗、耦合器插入损耗与耦合系数共同决定无源环形谐振腔的半峰全宽和谐振状态^[6~8]。在上述因素中,三个与损耗有关的量是主要因素。从谐振原理可知,插入损耗与波导损耗越低越有利于改善无源环形谐振腔的谐振特性,压缩半峰全宽。此二者取决于一定时期的工艺水平,没有调控的空间与必要。耦合系数则不然。它对无源环形谐振腔谐振特性的影响具有两重性^[9],既有优化的可能性也有优化的必要性。汤全安等^[10]以光纤环为研究对象,通过理论推导与仿真得出结论:谐振式光学陀螺中反射式无源环形谐振腔的最佳耦合系数约为 5%。本文在相同的系统结构基础上,基于调频光谱、多光束干涉与耦合模理论,通过耦合系数对半峰全宽、谐振特性的影响进而决定系统标度因子过程的分析,论述了聚合物集成光学陀螺最佳耦合系数的存在与确定方法。最后通过仿真对分析的结果进行了对比验证。

2 原 理

2.1 谐振式光学陀螺的标度因子

谐振式光学陀螺中,通过标度因子反映系统灵敏度。其定义为单位萨尼亚克频移引致系统输出光电流变化^[6~8]。以图 1 所示结构的无源环形谐振腔为敏感元件、图 2 所示结构的谐振式光学陀螺中,光电检测器的输出反映萨尼亚克频移量的大小。

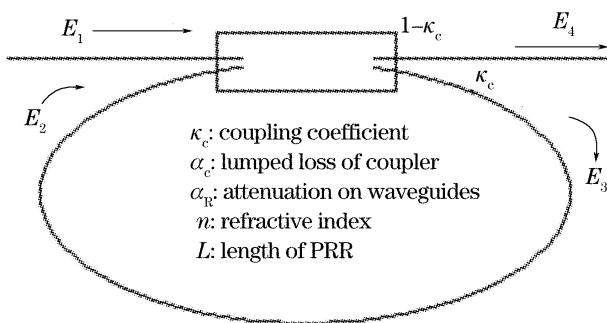


图 1 无源环形谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passive ring resonator

理想光源近似下,且调制频率选择决定于半峰全宽最佳的调制频率^[5],标因子为^[6~8]

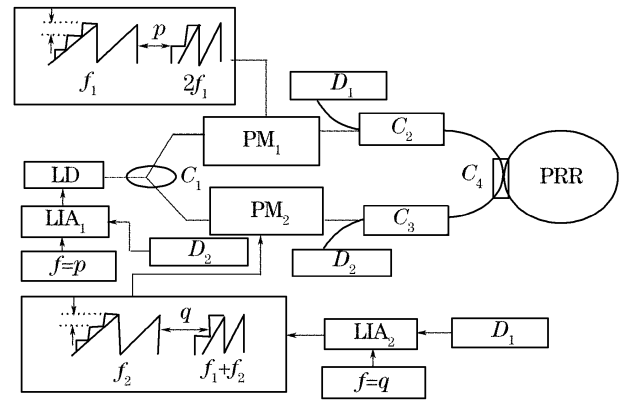


图 2 谐振式聚合物集成光学陀螺结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of polymer integrated optic gyros

$$K = \frac{I_{DI}}{\Delta f} \Big|_{\Delta f \rightarrow 0} = \frac{3\sqrt{3}}{4} (1 - \alpha_c) I_0 \frac{\rho}{\Gamma_c} \quad (1)$$

式中 I_0 为光源输出光强, ρ 为无源环形谐振腔的谐振深度, $2\Gamma_c$ 为无源环形谐振腔传递函数的半峰全宽。

2.2 耦合系数变化对 ρ 和 Γ_c 的影响

谐振式光学陀螺要求无源环形谐振腔谐振或近谐振状态。根据多光束干涉原理^[9],除频率条件外,当

$$\kappa_r = 1 - (1 - \alpha_c) \exp(-\alpha_r L) \quad (2)$$

时,无源环形谐振腔谐振, $\rho = 1$; 当 κ_c 偏离 κ_r 时, $\rho < 1$, 无源环形谐振腔偏离谐振。一般情况下,有^[6~8]

$$\rho = 1 - \frac{1}{1 - \alpha_c} \left[T^2 - \frac{2TR}{1 - Q} + \frac{R^2}{1 - Q^2} \cdot \frac{1 + Q}{1 - Q} \right], \quad (3)$$

其中^[6~8]

$$T = \sqrt{1 - \kappa_c} \sqrt{1 - \alpha_c}, \quad (4)$$

$$R = \kappa_c (1 - \alpha_c) \sqrt{1 - \alpha_r}, \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{1 - \alpha_r} \sqrt{1 - \kappa_c} \sqrt{1 - \alpha_c}. \quad (6)$$

图 3 为聚合物集成光学陀螺中典型结构无源环形谐振腔其他参量给定后, κ_c 对 ρ 的影响。

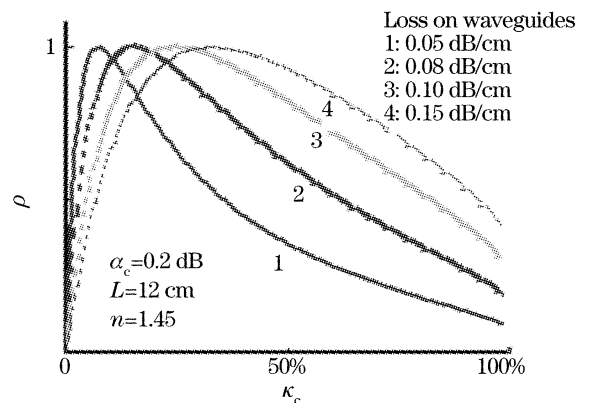


图 3 κ_c 对 ρ 的影响

Fig. 3 Emulation results of the effect of κ_c on ρ

同样,由多光束干涉原理, Γ_c 为^[6~8]

$$\Gamma_c = \frac{c}{2\pi n l} \cdot \left(\frac{1-Q}{\sqrt{Q}} \right), \quad (7)$$

由(6)式、(7)式,有

$$\frac{d\Gamma_c}{d\kappa_c} = \frac{1}{4(1-\kappa_c)} \cdot \Gamma_c. \quad (8)$$

根据相关参量定义,(8)式恒大于零,即 Γ_c 是 κ_c 单调增函数。

3 最佳耦合系数

根据(1)式, κ_c 变化对标度因子的影响,通过 ρ/Γ_c 反映。考虑 κ_c 由小变大时的情形。 Γ_c 是 κ_c 的单调增函数,随之增加。对 ρ 分两个区间考虑:

$\kappa_c \in [0, k_r]$ 时, ρ 为 κ_c 的增函数; $\kappa_c \in [k_r, 1)$ 时, 则 ρ 是 κ_c 的减函数。这表明在 $\kappa_c \in [0, k_r]$ 时, κ_c 的增加有可能优化系统标度因子。

进一步,设 ρ' 、 Γ_c' 分别是 ρ 、 Γ_c 关于 κ_c 的一阶导数。当 κ_c 有 $\Delta\kappa_c$ 极小增量时:

$$\rho(\kappa_c + \Delta\kappa_c) = \rho(\kappa_c) + \Delta\rho = \rho(\kappa_c) + \rho' \times \Delta\kappa_c, \quad (9)$$

$$\Gamma_c(\kappa_c + \Delta\kappa_c) = \Gamma_c(\kappa_c) + \Delta\Gamma_c = \Gamma_c(\kappa_c) + \Gamma_c' \times \Delta\kappa_c, \quad (10)$$

当且仅当

$$\frac{\rho + \rho' \times \Delta\kappa_c}{\Gamma_c + \Gamma_c' \times \Delta\kappa_c} \geq \frac{\rho}{\Gamma_c} \quad (11)$$

时,增加 κ_c 总有利于提高标度因子;等号成立时,标度因子取最大值。

对(11)式取等号,展开化简后得

$$\rho'/\rho = \Gamma_c'/\Gamma_c, \quad (12)$$

由此式决定的耦合系数为陀螺系统的最佳耦合系数。

进一步分析可以发现, $\kappa_c = \kappa_r$ 时,无源环形谐振腔谐振, $\rho' = 0$,标度因子不可能取最佳值,最佳耦合系数总小于 k_c ,二者具有不同的物理意义。谐振式光学陀螺实现最佳灵敏度时,无源环形谐振腔只能工作于近谐振。波导传输损耗越小,二者之间差别越小,对标度因子的影响也越小。文献[10]中,针对光纤环形腔情形得出的结论只是波导损耗 α_R 极小而有 $\exp(-\alpha_R L) \approx 0$ 时的特例——耦合系数决定于耦合器的插入损耗。

图4为不同参量条件下耦合系数对标度因子影响的仿真结果。不失一般性,光强值取1,标度因子值取其变化趋势。

表1为图4所示参量与光纤传输损耗数量级情形下,根据(12)式,结合文献[10]计算出的最佳耦合

系数与谐振条件要求耦合系数值。

由图4、表1可以看出,波导损耗水平不同,最佳耦合系数也不同,不存在适用于不同波导损耗水平固定的最佳耦合系数。为实现最佳灵敏度,需根据不同波导传输损耗水平,结合其他参量,由(12)式确定最佳耦合系数的值。

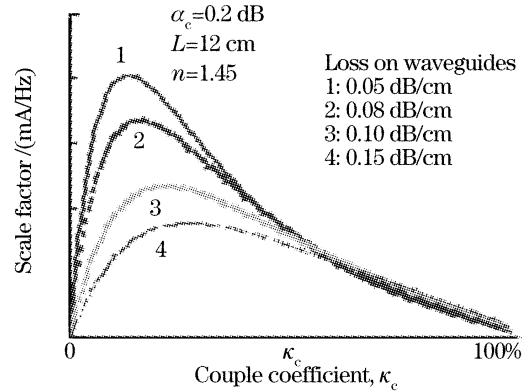


图4 κ_c 对标度因子的影响

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

表1 传输损耗对耦合系数的影响

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

Loss on waveguides / (dB/cm)	Resonant coupling coefficient / %	Optimum coupling coefficient / %
0.000001	5	2.5
0.05	17	8.5
0.08	24	13
0.10	28	16
0.15	38	20

4 结 论

通过对耦合系数与无源环形谐振腔的谐振深度、谱宽间关系的研究,分析了它们随耦合系数变化情形;以陀螺标度因子优化为判据,证明了谐振式光学陀螺存在最佳耦合系数并给出相应的确定方法,指出为实现最佳灵敏度,对聚合物集成光学陀螺需要根据波导传输损耗具体情况确定无源环形谐振腔中耦合系数的取值。本文结论,为优化以聚合物集成光学陀螺为代表的具有相对高波导传输损耗集成光学陀螺性能提供另一个切入点。

参 考 文 献

- Zhang Shaoxian, Zeng Xuefei, Liu Yongzhi. A kind of optical gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 117~120 (in Chinese)
- 张少先,曾雪飞,刘永智. 谐振腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 117~120

- 2 Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei *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)
金世龙,龙兴武,王 飞等. 激光陀螺克服高低温冲击的技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 409~414
- 3 Mao Caihong, Hu Huizhu, Liu Cheng *et al.*. A theoretical and experimental study of cross-winding fiber optical coil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 552~555 (in Chinese)
毛彩虹,胡慧珠,刘 承等. 交叉子光纤环的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 552~555
- 4 Aydin Yeniay, Renfeng Gao, Yongming Cai *et al.*. Integrated polymer photonic device platrofm[J]. *Photographic Science and Photochemistry*, 2004, **22**(6): 444~454
- 5 Manfred Gehrtz, Gary C. Bjorklund. Quantum-limited laser frequency-modulation spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2**(9): 1510~1525
- 6 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Research on signal detection method of resonator fiber optic gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(8): 1001~1005 (in Chinese)
马慧莲,金仲和,丁 纯等. 谐振腔光纤陀螺中信号检测方法的
研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 1001~1005
- 7 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral line-width of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(8): 731~734 (in Chinese)
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
- 8 Li Ruchun, Ma Huilian. Research on digital modulated resonator fiber-optic gyro [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(6): 419~421 (in Chinese)
李如春,马慧莲. 数字调制的谐振式光纤陀螺[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(6): 419~421
- 9 Yoshihiro Ohtsuka. Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope: dependence on resonator parameters and light-source coherence [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(2): 378~383
- 10 Tang Quan'an, Ma Xinyu. Experimental study on fiber ring resonator in resonator fiber optic gyroscope[J]. *Infrared and Laser Engng.*, 1998, **27**(4): 33~36 (in Chinese)
汤全安,马新宇. 谐振式光纤陀螺中光纤环形谐振腔的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 1998, **27**(4): 33~36