

文章编号: 0258-7025(2010)01-0105-05

二氧化硅光波导环形谐振腔的背向散射特性

马慧莲 鲍慧强 金仲和

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 谐振式微型光学陀螺(RMOG)是利用光学萨格纳克(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,光波导环形谐振腔是谐振式微型光学陀螺的核心敏感部件。利用谐振腔内单点反射简化处理,结合多光束干涉叠加原理,得出了谐振腔背向散射输出谱线的表达式。在此基础上,利用激光器输出光频率进行扫描,对研制的保偏二氧化硅光波导环形谐振腔芯片进行了谐振曲线和背向散射谱的测试,得到了描述谐振腔背向散射特性的背向散射系数,实际测试曲线和理论仿真曲线吻合较好。

关键词 集成光学; 环形谐振腔; 二氧化硅光波导; 背向散射

中图分类号 TN629.1; TN814+.6 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103701.0105

Backscattering in a Silica Optical Waveguide Ring Resonator

Ma Huilian Bao Huiqiang Jin Zhonghe

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Resonator micro optic gyroscope (RMOG) is a novel optical rotation sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. Optical ring resonator is the key sensing element in RMOG. Using one-point reflection to simplify the distributed backscattering phenomenon in the resonator, combining the overlapping method of multiple beams, backscattering spectrum is theoretically formulated. On this basis, when the laser frequency is swept linearly to time, the resonance curve and the backscattering curve are measured on the polarization maintaining silica optical ring resonator. The backscattering coefficient is successfully obtained. Simulation shows that the experiments fit well with those obtained theoretically. It will supply the theoretical support to make research on the backscattering induced noise in RMOG.

Key words integrated optics; ring resonator; silica optical waveguide; backscattering

1 引 言

谐振式微型光学陀螺(RMOG)是利用光学萨格纳克(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^[1~3],光波导环形谐振腔^[4]是其核心敏感部件,是此种陀螺设计和制造的关键。在谐振式光学陀螺的环形谐振腔中,需要同时引入顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向的两束光,CW方向光束在谐振腔中传输时产生的背向散射光对CCW光束来说是一种干扰,反之亦然。由于谐振式光学陀螺要求高相干光学,背向散射噪声

已成为影响陀螺精度提高的最主要光学噪声之一^[5,6]。相对于普通光纤,平面光波导回路(PLC)有相对较高的损耗及某些制造缺陷,所以,背向散射噪声与光纤陀螺相比,对RMOG的影响更为严重。背向散射光的干扰分为两类,1)背向散射光本身的光强;2)散射光与信号光之间的干扰。为消除散射光本身光强的作用,可以采取对CW和CCW回路施加不同频率/相位的调制信号来克服^[7];为克服背向散射光与信号光之间形成的相干光,通常采取抑制载波的方法。这样,背向散射光波对相向传播的

收稿日期: 2008-12-26; 收到修改稿日期: 2009-06-11

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20060335064)资助课题。

作者简介: 马慧莲(1975—),女,副教授,硕士生导师,主要从事集成光学器件和光学传感技术等方面的研究。

E-mail: mahl@zju.edu.cn

信号光波的干涉就不包含在陀螺的带宽之内。研究光波导环形谐振腔的背向散射特性,有利于得到不同精度陀螺所要达到的载波抑制系数,进而采取不同的载波抑制技术。

一般地,介质光波导中背向散射特性的分析需要采用求解环路积分^[5,8]的方式,由于实际光波导中折射率分布满足 $\langle \Delta n \rangle = 0$,这里 Δn 表示折射率波动, $\langle \rangle$ 表示整体平均。本文采用腔内单点反射等效处理,利用多光束干涉叠加法,同时得到了谐振光束及其背向散射谱表达式,利用激光器输出光频率进行扫描,对研制的保偏二氧化硅光波导环形腔芯片进行了测试,得到了背向散射系数,将谐振腔应用于 RMOG,计算表明背向散射噪声高达 4.5×10^3 ($^\circ$)/s。

2 背向散射特性分析

背向散射谱的测试系统如图 1 所示。光纤激光器 (FL) 输出的激光经过环形器 CIR1 后到达二氧化硅光波导环形谐振腔的输入端口,然后经过谐振腔耦合器 (DC) 耦合进入环形谐振腔,光在环形谐振腔中沿 CW 方向传输;多光束干涉叠加后从谐振腔输出进入环形器 CIR2 的输入端口 1,在 CIR2 的输出端口 2 用光电探测器 PD1 可检测谐振腔 CW 方向的光束信号。当 CW 光束在谐振腔内绕环多次传输时,腔内散射光束将沿 CCW 方向绕环多次,散射光经谐振腔耦合器耦合出进入 CIR1 的端口 2,用光电探测器 PD2 在环形器 CIR1 的 3 端口可以观察散

射光束信号。如图 1 所示,把 CCW 方向定义为 z 轴方向,DC 处为 $z = 0$ 的点。CCW 光束进入谐振后在腔内 Q 点, ($z = z_s$) 被反射。

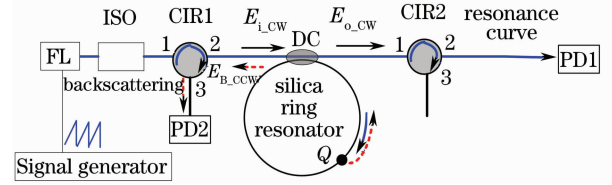


图 1 背向散射谱测试系统

Fig. 1 Setup for measuring the backscattering in the silica ring resonator

设激光器的输出光场表示为

$$E_{FL}(t) = E_0 \cdot \exp[j(2\pi ft + \varphi_0)], \quad (1)$$

式中 E_0 , f 和 φ_0 分别表示激光器的输出光场幅度、频率及初始相位, t 为时间因子。经光隔离器 (ISO) 及 CIR1 后进入 SiO_2 光波导环形谐振腔,输入光场可表示为

$$E_{i,CW}(t) = E_0 \sqrt{1 - \alpha_1} \cdot \exp[j(\omega t + \varphi_1)], \quad (2)$$

式中 α_1 表示从激光器输出端口到达谐振腔耦合器输入端口处的光功率传递系数, φ_1 表示输入光场的相位信息, ω 为激光器输出光角频率。为简单起见,不考虑激光器的相位时间波动特性,下面将忽略 φ_1 的影响。

对于谐振腔内 CW 方向光束而言,可以将等效反射点引入的损耗包含到腔内总传输损耗上。利用多次干涉叠加法,从谐振腔耦合器输出的 CW 方向的谐振光束可表示为^[9]

$$E_{o,CW} = E_0 \exp(j\omega t) \sqrt{1 - \alpha_1} \left\{ \sqrt{(1 - k_C)(1 - \alpha_C)} - k_C t_f (1 - \alpha_C) \sum_{m=1}^{\infty} [t_f \sqrt{(1 - k_C)(1 - \alpha_C)}]^{m-1} \times \exp(-jm\omega\tau) \right\} = E_0 \exp(j\omega t) \sqrt{1 - \alpha_1} \left[T - R' \frac{\exp(-j\omega\tau)}{1 - Q' \exp(-j\omega\tau)} \right], \quad (3)$$

式中

$$Q' = t_f \sqrt{(1 - k_C)(1 - \alpha_C)}, \quad T = \sqrt{(1 - k_C)(1 - \alpha_C)}, \quad R' = k_C \cdot t_f (1 - \alpha_C),$$

k_C, α_C 表示谐振腔耦合器耦合系数和插入损耗, t_f 表示光绕环形谐振腔一周的光场幅度传输系数, $t_f = \sqrt{10^{-\alpha_L L/10}}$, L 表示环形谐振腔的总长度, τ 表示光在环形腔中传输一周的渡越时间, $\tau = Ln_1/c$, n_1 为 SiO_2 光波导有效折射率, c 为真空中光速。则在 PD1 测得的光功率为

$$P_{PD1} = P_{FL} (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) \left[T^2 - \frac{2TR'(\cos \omega\tau - Q') - (R')^2}{(1 - Q')^2 + 4Q'\sin^2(\omega\tau/2)} \right], \quad (4)$$

式中 P_{FL} 是光纤激光器的输出光功率, α_2 表示从谐振腔耦合器输出端口到达 CIR2 端口 2 时的功率传递系数。

假设进入谐振腔的 CW 光束在环中 Q 点 ($z = z_s$) 被反射,反射光沿 CCW 方向传播,到达谐振腔耦合器时的背向反射电场 $E_b(z_s, t)$ 可表示为

$$E_b(z_s, t) = E_0 10^{-\alpha_L z_s/10} \exp(-j\eta) \sqrt{R_B} \sqrt{1 - \alpha_1} \sqrt{k_C(1 - \alpha_C)} \{ \exp[j(\omega t - 2\beta z_s)] + \exp[j(\omega t - 2\beta z_s - \omega\tau)] Q' + \dots + \exp[j(\omega t - 2\beta z_s - m\omega\tau)] (Q')^m + \dots \} =$$

$$\frac{E_0 10^{-\alpha_L z_s/10} \sqrt{R_B} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} \exp[j(\omega t - \eta - 2\beta z_s)]}{1 - Q' \exp(-j\omega\tau)}, \quad (5)$$

式中 η 表示入射电场与反射电场之间的相位差, α_L 为单位长度光波导传输损耗 (dB/cm), R_B 表示 Q 点反射系数, 也就是长度为 L 的一段光波导上的等效背向散射系数, 可表示为^[8]

$$R_B = (1 - 10^{-\alpha_L \cdot L/10}) \times S, \quad (6)$$

式中 S 是捕捉系数, 描述了被光波导再捕捉到并在光波导中形成反向传输的那部分散射光束, 捕捉系数和光波导的数值孔径有关, 可表示为

$$S = \left(\frac{d_{NA}}{n_1}\right)^2 \frac{1}{p}, \quad (7)$$

式中 d_{NA} 是二氧化硅光波导的数值孔径, 参数 p 取决于光波导结构参数, 一般地, 单模光纤结构中 p 取 4.55^[10]。考虑反射光波绕谐振腔多次传输、多次干涉叠加后的总反射电场可表示为

$$E_{B_CCW} = \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} E_b(z_s, t) + \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} Q' E_b(z_s, t - \tau) + \dots + \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} (Q')^m E_b(z_s, t - m\tau) = \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} \sum_{m=0}^{\infty} (Q')^m E_b(z_s, t - m\tau), \quad (8)$$

将(5)式代入(8)式可得到

$$E_{B_CCW} = E_0 \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} 10^{-\alpha_L z_s/10} \sqrt{R_B} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{k_C(1-\alpha_C)} \frac{\exp[j(\omega t - \eta - 2\beta z_s)]}{1 - Q' \exp(-j\omega\tau)} \times \sum_{m=0}^{\infty} \exp(-j\omega m\tau) (Q')^m = \frac{E_0 k_C(1-\alpha_C) 10^{-\alpha_L z_s/10} \sqrt{R_B} \sqrt{1-\alpha_1} \exp[j(\omega t - \eta - 2\beta z_s)]}{[1 - Q' \exp(-j\omega\tau)]^2}, \quad (9)$$

在环形器端口 3 处的背向反射电场 E_{PD2} 为

$$E_{PD2} = \frac{E_0 k_C(1-\alpha_C) 10^{-\alpha_L z_s/10} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{R_B} \exp[j(\omega t - \eta - 2\beta z_s)]}{[1 - Q' \exp(-j\omega\tau)]^2}, \quad (10)$$

式中 α_3 表示反射光经谐振腔耦合器输出后, 经 CIR1 端口 2 到 3 端口的功率传输损耗。则 PD2 处的反射功率可计算为

$$P_{PD2} = \frac{P_{FL}}{E_0^2} \times |E_{PD2}|^2 = \frac{P_{FL}}{E_0^2} \times \left| \frac{E_0 k_C(1-\alpha_C) 10^{-\alpha_L z_s/10} \sqrt{1-\alpha_1} \sqrt{1-\alpha_3} \sqrt{R_B} \exp[j(\omega t - \eta - 2\beta z_s)]}{[1 - Q' \exp(-j\omega\tau)]^2} \right|^2 = \frac{P_{FL}(1-\alpha_1)(1-\alpha_3)R_B \times k^2(1-\alpha_C)^2 10^{-\alpha_L z_s/5}}{[1 + Q^2 - 2Q' \cos \omega\tau]^2} = \frac{P_{FL}(1-\alpha_1)(1-\alpha_3)R_B k_C^2(1-\alpha_C)^2 10^{-\alpha_L z_s/5}}{(1-Q')^4} L^2(\omega\tau/2), \quad (11)$$

式中

$$L(\omega\tau/2) = \frac{(1-Q')^2}{(1-Q')^2 + 4Q' \sin^2\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}, \quad (12)$$

由(11)和(12)式可知, 腔内假设单点反射时得到的反射光束输出谱线具有和谐振曲线一样的洛仑兹线形, 由于谐振曲线由绕谐振腔多次传输的多光束叠加而成, 每一次绕环传输时, 都会产生各自的背向散射光束, 这些背向散射光束本身又绕谐振腔多次传输, 因此最后从谐振腔输出的背向散射曲线具有洛仑兹函数平方的关系。

3 腔内背向散射系数测试和分析

在图 1 所示实验装置上, 利用锯齿波信号发生

器对光纤激光器(中心波长 1550 nm, 线宽 4 kHz)输出光频率进行扫描, 在光电探测器 PD1 和 PD2 处可分别检测谐振腔 CW 方向的谐振输出曲线和背向散射输出曲线, 如图 2 所示。由图 2 可得最大背向散射峰电压为 34.7 mV, 谐振深度为 1.914 V, 因此最大反射峰和谐振深度的比值为 1.81%。同时由图 2 测得的谐振输出曲线, 可以进一步得到谐振腔清晰度为 33.62, 谐振深度为 0.809。谐振腔耦合器耦合系数、谐振腔总损耗(包括耦合器损耗和腔内传输损耗)可用清晰度 F 和谐振深度 ρ 表示为^[11]

$$\left\{ \begin{aligned} k_c &= \frac{1 - \left[\frac{1 - \sin(\pi/F)}{\cos(\pi/F)} \right]^2}{\frac{1 + \sqrt{1-\rho}}{1 - \sqrt{1-\rho}} \times \frac{1 - \sin(\pi/F)}{\cos(\pi/F)} + 1}, \\ 10^{-\langle \alpha'_c + \alpha_l \cdot L \rangle / 10} &= \frac{\frac{1 + \sqrt{1-\rho}}{1 - \sqrt{1-\rho}} \times \left[\frac{1 - \sin(\pi/F)}{\cos(\pi/F)} \right]^2 + \frac{1 - \sin(\pi/F)}{\cos(\pi/F)}}{\frac{1 + \sqrt{1-\rho}}{1 - \sqrt{1-\rho}} + \frac{1 - \sin(\pi/F)}{\cos(\pi/F)}}, \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中 α'_c 为以 dB 表示的耦合器损耗。由(13)式数值计算可得谐振腔耦合器耦合系数 $k_c = 0.0514$, 谐振腔总损耗 0.5835 dB。

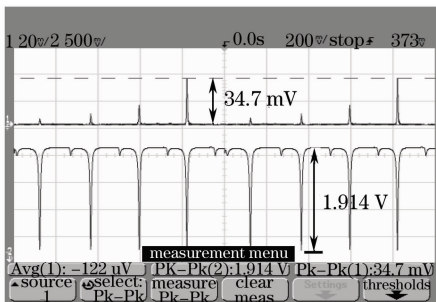


图 2 谐振曲线和背向散射测试结果

Fig. 2 Measured resonance curves and the backscattering

由(13)式计算可知,利用谐振腔清晰度和谐振深度两个参数,无法将谐振腔耦合器耦合损耗和光波导传输损耗这两个参数进行分离。由(6)式可知,腔内背向散射来源于光波导损耗,利用图 2 测得的背向散射峰值和信号光谐振深度的数值关系,结合背向散射谱(11)式,可以进一步得到背向散射系数为 3.93×10^{-4} 。其他计算参数如下:激光器工作波长 1550 nm, SiO₂ 光波导环形谐振腔总长 7.9 cm,有效折射率 1.45,数值孔径 0.1778。图 3 给出了利用上述计算参数根据(11)式计算得到的 CW 谐振

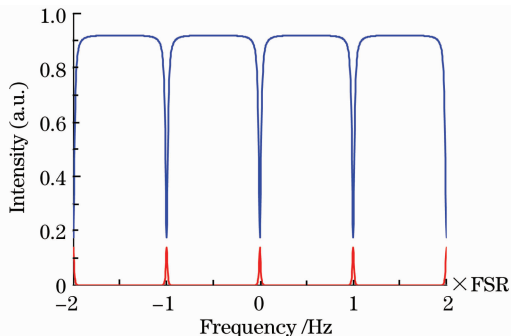


图 3 仿真得到的 CW 谐振曲线和其反射谱曲线(FSR 为自由谱域)

Fig. 3 Simulation of resonance curves and the backscattering (FSR: free spectral range)

曲线及其反射谱曲线,为了比较清楚地观察反射谱曲线,图 3 中反射谱曲线已放大 10 倍。由于在仿真计算时,反射光场和入射电场间的相位差考虑的是最大反射峰情况,实际背向散射峰大小受散射电场与入射电场之间的相位差 η 的影响,因此图 2 所示实验观察到的反射峰大小随激光器输出光频率(相位)发生变化。

由于输入光束绕环形谐振腔的多次传输,腔内光强(P_c)和入射光强(P_{in})间的关系可表示为^[12]

$$\frac{P_c}{P_{in}} = \frac{F}{2\pi}, \quad (14)$$

式中 $F/2\pi$ 表示谐振腔对输入光强的倍增系数。考虑谐振腔倍增系数后的背向散射系数为 0.0021,与文献[6]中给出的经验值吻合较好。根据文献[6]给出的经验公式将上述 SiO₂ 光波导环形谐振腔应用于 RMOG 系统,可进一步计算得到没有考虑载波抑制时背向散射噪声大小高达 4.5×10^3 (°)/s。因此,为研制高精度 RMOG,需要采取高载波抑制技术,进一步克服背向散射噪声。

4 结 论

背向散射噪声是限制 RMOG 精度提高的最主要噪声之一,本文建立了利用腔内单点反射等效近似计算背向散射系数大小的理论模型,并通过实验测试,得到了谐振腔背向散射系数大小。理论仿真表明,单点反射近似模型计算得到的背向散射系数和实际测试结果吻合较好。将研制的 SiO₂ 光波导环形谐振腔应用于 RMOG 系统,并进一步计算了对 RMOG 背向散射噪声的影响,可为高精度 RMOG 研制提供理论参考。

参 考 文 献

- 1 A. W. Lawrence. Thin film laser gyro[P]. U. S. Patent; 4 326 803, 1982
- 2 Peng Bo, Yang Zhihui, Ma Huilian *et al.*. Digitalization of the detection circuit for resonator fiber optic gyro based on the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009,

- 36**(6): 1479~1483
- 彭 博, 杨志怀, 马慧莲 等. 基于调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺检测电路数字化研究 [J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1479~1483
- 3 K. Suzuki, K. Takiguchi, K. Hotate. Monolithically integrated resonator micro optic gyro on silica planar lighwave circuit [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1): 66~72
- 4 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Optimal design of ring resonator in silica optical waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1330~1332
马慧莲, 金仲和, 丁 纯 等. 二氧化硅光波导环形谐振腔 [J]. 中国激光, 2005, **32**(10): 1330~1332
- 5 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3916~3924
- 6 T. J. Kaiser, D. Cardarelli, J. Walsh. Experimental development in the RFOG [C]. *SPIE*, 1990, **1367**: 121~126
- 7 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1529~1533
- 张旭琳, 马慧莲, 丁 纯 等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(11): 1529~1533
- 8 M. Nakazawa. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(9): 1175~1180
- 9 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
- 10 D. Derickson. *Fiber Optic Test and Measurement*[M]. Prentics Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1998. 450
- 11 Huilian Ma, Shijun Wang, Zhonghe Jin. Measurements of excess loss of the crossed waveguide using optical waveguide ring resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 6016~6018
- 12 Stokes Loren Frank. Sing mode optical fiber resonator and applications to sensing (fiber sensor, fiber laser, fiber gyroscope) [D]. Stanford University, 1984. 123~124