

文章编号: 0253-2239(2003)01--117-04

谐振腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺

张少先 曾雪飞 刘永智
(电子科技大学光电子技术系, 成都 610054)

摘要: 研究了光学环形腔中的单方向传输光在光学谐振腔中传输的情况, 在系统旋转角速率变化时光束会产生频移, 在此基础上, 设计出一种具有谐振腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺结构, 可以方便地检测出系统旋转角速率与方向, 其检测精度与光波导谐振腔的品质无关。和萨尼亚克集成光波导陀螺相比较, 性能价格比有进一步提高的潜力。

关键词: 应用光学; 集成光波导陀螺; 单方向光; 光波导谐振腔; 马赫-曾德尔干涉

中图分类号: V241.5⁺9 文献标识码: A

1 引 言

集成光波导陀螺是近年来继激光陀螺、光纤陀螺后提出的一种新型全固态惯性仪表, 它在航天、航空、航海和车辆行驶等方面有着广泛的应用前景。集成光波导陀螺采用先进的集成光学技术, 与传统光学陀螺相比, 具有体积小、重量轻、耐振动、成本低和抗电磁干扰等诸多优点, 是下一代光学陀螺的发展方向之一。

目前, 集成光波导陀螺结构形式基本都是以萨尼亚克效应为理论基础, 要求谐振腔中有两束光沿相反方向传输, 由于要求这两束光有良好的互易性, 且谐振腔的品质要求比较高, 因而实现起来困难较大^[1,2]。本文研究分析一种具有谐振腔马赫-曾德尔干涉的集成光学陀螺结构, 在其谐振腔中光是单方向传播的, 且对谐振腔的品质因数要求不高。

2 理论基础

对任意形状的环形光轨道, 如图 1 所示, B 位于光轨上任一点, l_1 为上圆弧长, l_2 为下圆弧长。由光源发出的频率为 ω 、真空中波长为 λ 的光从 A 点进入光路, 分离成逆时针和顺时针方向的两路光 (分别为 L 光和 R 光)。光路上任一点沿传播方向的线微分矢量为 $d\mathbf{l} = \mathbf{v}dl$, 式中 \mathbf{v} 为切向单位矢量, dl 为 $d\mathbf{l}$ 的模。

当光路系统以 O 点为中心, 以垂直于纸面的角

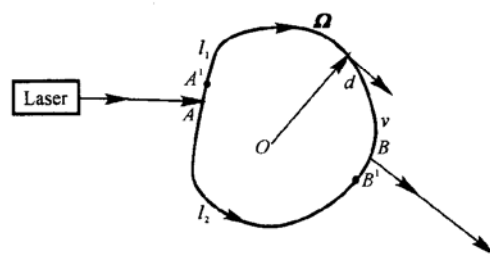


Fig. 1 Schematic diagram of principle (random figure of optical orbit)

速度 Ω 旋转时, 其在 \mathbf{v} 方向的线速度分量为 $u_s = \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}$ 。式中 \mathbf{v} 为沿 Ω 方向线速度矢量, 且 $\mathbf{v} = \mathbf{r} \Omega$; \mathbf{r} 为由 O 点到任意点的矢径。两路光到达汇合点 (A 、 B 点分别转至 A' 、 B' 点), 根据相对论, R 光传播 dl 的时间为

$$dt_R^1 = \frac{dl + u_s dt_R^1}{c/n + u_s(1 - 1/n^2)}, \quad (1)$$

考虑 $c \gg u_s$, 上式变为

$$dt_R^1 = \frac{ndl}{c} \left[1 + \frac{u_s}{nc} \right], \quad (2)$$

将(2)式沿着光路 l_1 积分, 得到

$$t_R^1 = \frac{nl_1}{c} + \int_{l_1} \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{c^2} dl, \quad (3)$$

同理可得

$$t_L^1 = \frac{nl_2}{c} - \int_{l_2} \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{c^2} dl, \quad (4)$$

因系统旋转而引起的相位差为

$$\Delta\theta = \omega(t_R^1 - t_L^1) - \Delta\theta_1 = \omega \oint \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{c^2} dl, \quad (5)$$

$\Delta\theta_1$ 为光路系统静止时 R 光与 L 光的相位差:

$$\Delta\theta_1 = \omega\Delta t = \omega \left[\frac{l_1}{c/n} - \frac{l_2}{c/n} \right], \quad (6)$$

根据斯托克斯定理可得

$$\Delta\theta = \frac{\omega}{c^2} \int_s \text{rot}(\Omega + \mathbf{r}) \cdot d\mathbf{s} = \frac{2\omega\Omega_s}{c^2} = \frac{4\pi s}{c\lambda} \Omega. \quad (7)$$

当系统旋转角速率处于变化过程中,由(7)式可知 $\Delta\theta$ 随时间变化,此时环形腔中传输光的频率发生变化(即此时光源和探测器之间发生了相对位移,导致传输光产生多普勒频移),R光与L光的频差为

$$\Delta f = \frac{2ns}{\lambda} \Delta\Omega, \quad (8)$$

式中, l 为光路长度, s 为闭合光路包围的面积; $d\mathbf{s}$ 为面元矢量, n 为介质折射率, $\Delta\Omega$ 为角速率的变化量。

从以上分析可得,频差 Δf 与光路轨道形状、旋转的中心位置无关,只与光路轨道的几何参量有关。设系统顺时针旋转方向为正方向(系统逆时针旋转角速率为负值),当系统旋转角速率增加时,光频 f 减少 Δf ;反之,光频 f 增加 Δf 。检测光频的变化就可以推知系统旋转速率的变化情况。

考虑当 B 点无限趋近于 A 点时的特殊情况,图1演变成如图2结构。

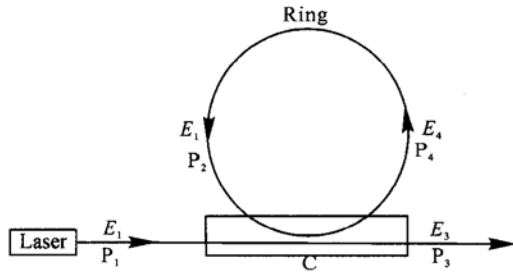


Fig. 2 Schematic diagram of optical resonator

图中 C 为定向耦合器, $P_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为定向耦合器的端口, $E_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为通过各端口 P_i 的光场幅值。设 r_0 为耦合器的插入损耗, α 为单位长度光学环形腔损耗, L 为光学环形腔的长度, b 为光学环形腔的半径。输入光由 P_1 进入,部分光被耦合进入 P_3 ,另一部分进入 P_4 ,从而形成光闭合回路。设耦合器光强耦合系数为 k ,根据光的耦合模理论得^[3]

$$E_2 = (1 - r_0)^{1/2} [(1 - k)^{1/2} E_1 + jk^{1/2} E_2], \quad (9)$$

$$E_4 = (1 - r_0)^{1/2} [jk^{1/2} E_2 + (1 - k)^{1/2} E_1] \quad (10)$$

而 E_2 与 E_4 的关系为

$$E_2 = \exp(-\alpha L) \exp(j\beta L) E_4, \quad (11)$$

β 为环形腔光学传播系数。

当系统静止时,光学环形腔满足谐振条件并达到稳态,谐振腔中的光将达到一种动态平衡,谐振的耦合系数条件为^[4]

$$k_r = 1 - (1 - r_0) \exp(-2\alpha L), \quad (12)$$

谐振的相位条件为

$$\beta L = m2\pi \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (13)$$

将(11)式、(12)式、(13)式代入(9)式得

$$\left| \frac{E_3}{E_1} \right|^2 = \frac{2(1 - r_0)(1 - k_r)(1 - \cos \beta L)}{1 + (1 - k_r)^2 - 2(1 - k_r) \cos \beta L}. \quad (14)$$

当 $m = 1, 2, 3, \dots$ 时,有

$$\left| E_3/E_1 \right|^2 = 0. \quad (15)$$

设 $r_0 = 5\%$, $\alpha = 0.01$ dB/m, $L = 0.3$ m, $|E_3/E_1|^2$ 与 βL 的关系如图3所示。

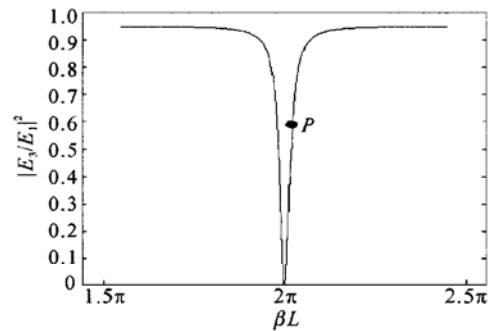


Fig. 3 Resonator output intensity ratio as functions of the optical length of the loop

设静止时,系统处于图3中的 P 点状态。此时谐振腔的输出光强为 E_P 。

当系统旋转角速率变化时,谐振腔腔长产生了变化,可表示为 $L \pm \Delta L$,“ \pm ”号分别表示为系统旋转角速率变大与减小, $\Delta L = bnL \Delta\Omega/c$ 。同时,谐振腔的谐振峰也产生平移。当系统顺时针旋转角速率增加时,如图4所示,谐振腔的谐振峰向右平移,谐振腔谐振频率的减少量为

$$\Delta f' = \frac{bn}{\lambda} \Delta\Omega = \frac{2\pi nb^2}{\lambda} \Delta\Omega. \quad (16)$$

比较(8)式和(16)式可得,当系统以变角速率旋转时,谐振腔谐振频率的变化量与在谐振腔中传播光的频率变化量相等,且变化方向一致。设系统以变角速率旋转前后,系统所处的状态分别为 P 和 P' ,则由

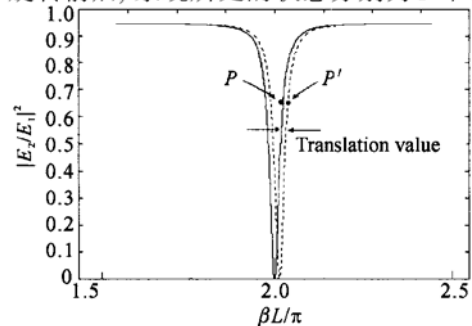


Fig. 4 Resonance peak shift caused by ΔL

上述分析可得,这两种状态下,谐振腔的输出光强不变.因此,对系统旋转角速率变化量的检测与谐振腔谐振峰的尖锐度即谐振腔的品质因数无关.

3 具有谐振腔的马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺的基本结构

采用马赫-曾德尔干涉方式可方便地检测出谐振腔中传播光的频率变化情况.如图5所示,频率为 f_0 、振幅为 $2e_0$ 的光经 1×2 分路器 C_1 等分为 I_1 、 I_2 两束光, I_1 光经耦合系数为 k_r 的定向耦合器 C_2 进入长度为 L 的光波导谐振腔(耦合器与光学谐振腔参量同图3),从 C_2 输出的 I_1 光经调相器 P 后与 I_2 光在合路器 C_3 进行零差.图5中 l_1 、 l_2 两臂等长为 l ; W 为两臂宽度,设 W 极小.

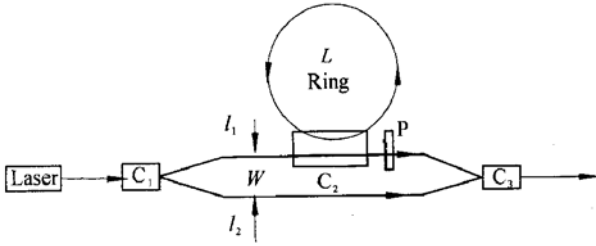


Fig. 5 The basic structure of optical gyroscope based on ring resonator and M-Z interference

设静止时,系统处于图4中的 P 点状态,设此时 $|E_3/E_1| = \eta$.当系统以变角速率转动时,根据(8)式,可得在 C_3 处

$$E_{I_1} = \eta e_0 \exp[-j\sqrt{2\pi}(f \pm \Delta f)t - nL/c - \psi_1 - \psi_2], \quad (17)$$

$$E_{I_2} = e_0 \exp[-j(2\pi ft - nL/c)], \quad (18)$$

ψ_1 为 I_1 光经调相器 P 而引起的附加相移; ψ_2 为 I_2 因耦合器 C_2 而引起的附加相移.

$$E = E_{I_1} + E_{I_2},$$

其光强为

$$I(t) = E(t)E^*(t) = e_0^2 [1 + \eta^2 + 2\eta \cos(\pm 2\pi \Delta f t + \psi_1 + \psi_2)]. \quad (19)$$

调节移相器 P ,使得 $\psi_1 + \psi_2 = \pi/2$,则上式变为

$$I(t) = e_0^2 [1 + \eta^2 - 2\eta \sin(\pm 2\pi \Delta f t)]. \quad (20)$$

将(8)式代入(20)式,可得

$$I(\Omega, t) = e_0^2 \left[1 + \eta^2(\Omega) \mp 2\eta(\Omega) \sin \left[\frac{4\pi n_s \Delta \Omega}{\lambda} t \right] \right]. \quad (21)$$

由图6可见,通过检测光强正弦变化的周期 T 可以获得 $\Delta \Omega$ 的大小,

$$\Delta \Omega = \lambda / (2n_s T). \quad (22)$$

由于当系统旋转角速率变化方向不同时,光强在最初四分之一周期的变化趋向是不同的,系统旋转角速率变大时, $dI/dt < 0$;反之, $dI/dt > 0$,据此可以得到 $\Delta \Omega$ 的方向.从图6(a)可知系统旋转角速率变大, $\Delta \Omega = 0.01 \text{ rad/s}$;图6(b)可知系统旋转角速率变小, $\Delta \Omega = -0.01 \text{ rad/s}$.

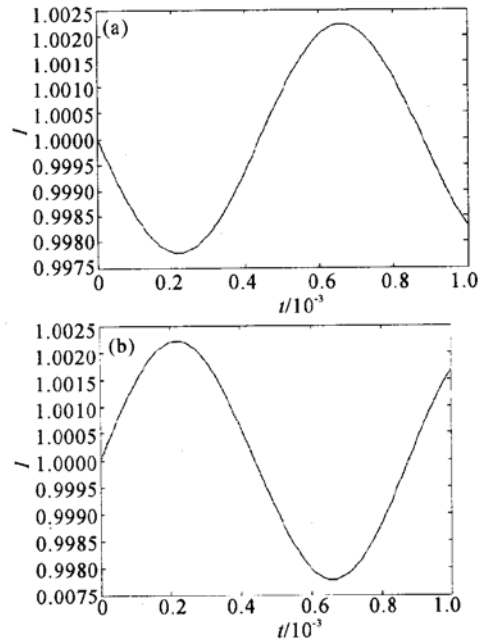


Fig. 6 I as the functions of t while $\Delta \Omega$ is constant

当系统开始旋转时通过此方法可获得系统的方向信息,并且对角速率的变化进行时间积分,可以实时地获得系统旋转的角度和角速率.当系统旋转角速率不变时,谐振腔中传输光的频率也不变,则此时的角速率为系统旋转角速率停止发生变化时刻得到的数值 Ω_1 .保持其不变,直到系统旋转角速率再次发生变化,则在 Ω_1 的基础上,可以得到此时系统旋转的角速率和旋转方向.如此则可以获得系统旋转全过程的参量.

4 性能分析

从(21)式、(22)式可见, $\Delta \Omega$ 越小,光强正弦变化的振幅也越小,而周期 T 越大,越有利于检测.因此,系统检测精度主要取决于马赫-曾德尔干涉的灵敏度.在具体设计和制作中,要求图5中的两条马赫-曾德尔干涉波导距离要很近,因为硅基 SiO_2 光波导和质子交换 LiNbO_3 光波导等性能都很稳定,外界对两个臂的干扰可以互相抵消.当光源的相干性很好时,这种结构的集成光波导陀螺可有较高的检测精度.

在噪声方面,主要有温度漂移、光源输出功率波动、反射和散射光以及偏振噪声等。从图 6 可以看出,信号光光强成正弦变化,因此对于温度漂移和光源输出功率的波动等噪声引起的谐振腔输出光强的随机变化可以通过信号处理的方式驱除。为减少背向散射的影响,应尽可能减少反射面,即减少插入的光学元件的个数。硅基 SiO_2 光波导和质子交换 LiNbO_3 光波导都有很好的单偏振工作特性,可以有效消除偏振噪声。

5 与萨尼亚克集成光波导陀螺的比较

萨尼亚克集成光波导陀螺对谐振腔的品质要求很高(因为光波导谐振腔面积太小,谐振腔品质因数大于 50 对陀螺检测才有意义),但是目前各种材料的光波导损耗都很高(目前损耗最低的用火焰水解淀积法制作的 Si 基 SiO_2 光波导损耗只能达到 0.01 dB 的水平),所以很难获取高品质的光波导谐振腔。本文提出的集成光波导陀螺结构检测精度与谐振腔的谐振峰的尖锐度即谐振腔的品质因数无关,因此不仅光波导谐振腔的制作难度得以降低,而且对光源等相关器件的要求可大大降低^[4]。同时,因为在谐振腔中采用单方向光传播,可以避免萨尼亚克陀螺要求对传的两束光有很好的互易性以及降

低克尔效应等所采取的复杂措施^[5]。

结语 本文提出一种谐振式集成光波导陀螺,利用马赫-曾德尔干涉方式检测出因系统旋转角速率变化引起的在谐振腔中单方向传输光的频移,经过信号处理可以方便地检测出系统的旋转角速率和方向。这种集成光波导陀螺对光波导谐振腔品质要求不高,适合制作低成本高精度的集成光波导陀螺。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xingzhou. Sagnac effect optical fiber gyro. *J. Transducer Technology* (传感器技术), 1998, **17**(1): 59~62 (in Chinese)
- 2 Tang Quanan, Ma Xinyu. The analysis of the passive ring resonator in the micro optic waveguide gyroscope. *Optical Technique* (光学技术), 1997, (5): 2~5 (in Chinese)
- 3 Feng Zhang. Direct-coupling single-mode fiber ring resonator. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(8): 1347~1355
- 4 Pan Zhenwu, Hu Chaoyang, Ma Xinyu *et al.*. Study of light source for resonant integrated optical rotation sensor. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2000, **29**(3): 56~59 (in Chinese)
- 5 Chen Shufen, Zhu Yong, Qin Binqian *et al.*. Theoretical analysis of noise on IFOG with integrated optics chip. *Optical Technique* (光学技术), 1999, (3): 8~10 (in Chinese)

A Kind of Optical Gyroscope Structure Based on Ring Resonator and Mach-Zehnder Interference

Zhang Shaoxian Zeng Xuefei Liu Yongzhi

(Department of Optoelectronic Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

(Received 5 November 2001; revised 21 January 2002)

Abstract: A theoretical study on the propagation of single-direction light in optical ring is presented. When the angular velocity changes, the frequency of single-direction light propagating in optical ring will shift. The analytical expressions are obtained for the resonance conditions when the light propagates in optical ring resonator. A kind of integrated optical waveguide gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference is designed, which provides a convenient way to sense both the angular velocity and rotational direction. And the precision of such gyroscope is independent of the finesse of optical waveguide ring resonator. Comparing with the optical waveguide ring resonator based on Sagnac effect, this kind of structure has potential to get better performance.

Key words: applied optics; integrated optical waveguide gyroscope; single directional light; optical waveguide ring resonator; Mach-Zehnder interference