

保偏光纤环形谐振腔研究*

汤全安 马新宇

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京, 100084)

摘要: 报道了一种用于角速度测量的光纤谐振式传感器保偏光纤环形谐振腔的研究, 给出了测量的原理、实验装置和实验结果。根据计算和实验结果, 对影响系统性能的几个重要光学参数进行了设计和优化。该谐振腔已在传感器系统中得到应用。

关键词: 保偏光纤谐振腔 角速度测量 光纤传感器

Study of polarization maintaining fiber ring resonator

Tang Quanan, Ma Xinyu

(Department of Precision Instrument and Mechanics, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: A kind of polarization maintaining fiber ring resonator used in fiber ring resonator sensor for angular velocity measurement is reported in this paper. The measurement principle is based on Sagnac effect. So the system is composed of a laser with narrow spectra, fiber resonator, detector and other control circuits. According to the numerical calculation and experimental results, several important optical parameters, which have influence on the performance of system, are analyzed and optimized. Now the fiber ring resonator has been adopted in the sensor system.

Key words: polarization maintaining fiber ring resonator angular velocity measurement fiber sensor

引 言

由于光纤通讯和光电子技术的飞速发展, 在世界范围内, 采用高性能光纤器件组成角速率传感器系统已经成为军用和民用领域的主要趋势之一。国外从 80 年代初, 即开始了光纤谐振式角速率传感器的研究工作^[1,2], 得到了较多的研究成果^[3-5], 但由于经济等方面的原因, 此类传感器一直处于实验阶段, 较实用化还有相当的距离。随着高性能保偏光纤价格的下降和集成光电子器件的广泛应用, 预计在 21 世纪此种角速率传感器将更加具有竞争力。

光纤谐振腔是光纤谐振式角速率传感器的核心敏感器件, 利用其尖锐的谐振峰锁定顺时针和逆时针方向的 Sagnac 频移并进行测量, 是其基本工作原理。为此, 需要建立一套包括窄线宽激光器、光纤谐振腔、探测器以及相关控制电路的光电系统, 并根据系统分辨率的要求, 对光学和电路系统进行优化设计。

作者介绍了基于 Sagnac 效应的光纤谐振式角速率传感器的基本原理, 在计算和模拟的基础上, 进行了光纤谐振腔参数的优化设计, 完成了谐振系统的实验装置, 并给出了实验结果。

一、基本工作原理和光学系统优化设计

1. 基本工作原理

* 国防科工委“九五”预研项目“光波导陀螺研究”项目资助。

光纤谐振式角速率传感器的工作原理类似于光纤干涉式角速率传感器^[7],但又有很大的不同,它们的基本原理都是利用 Sagnac 效应进行测量,但是前者利用在谐振腔中激励双路相反方向谐振的方法,可以大大缩短光纤的长度,从而降低光路系统的成本,据计算,在达到相同分辨率的要求下,谐振式只需干涉式 1/100 左右长度的光纤。图 1 为谐振式角速率传感器的测量装置示意图。

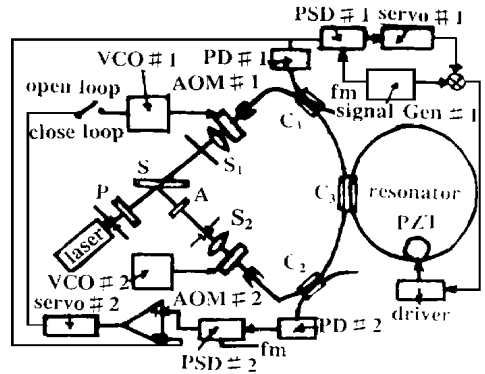


Fig.1 Scheme diagram of resonator angular velocity sensor

中心波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 红外激光器经过一个起偏器 P 并由分束器 S 平均分成两路,由透镜 S_1 和 S_2 耦合进入到环形谐振腔的两个输入、输出耦合器 C_1 和 C_2 中,并经 2×2 方向耦合器 C_3 进入环形谐振腔,形成两束相反方向的对称传播光。在环形谐振腔中采用压电陶瓷器件 PZT 对腔长进行调制,从而完成对谐振腔谐振峰值的扫描。在输入、输出耦合器 C_1, C_2 的输出端,两个 PIN-FET 光接收器 PD#1 和 PD#2 将输出谐振腔的光信号转变为电信号并送到记录装置。

根据光学谐振腔的基本原理,在谐振腔满足谐振条件并达到稳态时,环形腔中的光强达到最大,即谐振状态。因此,在图 1 所示系统中,可以在谐振腔中同时激励出顺时针 (CW) 和逆时针 (CCW) 两个方向的谐振状态,在系统非互易量为零,即相对惯性空间静止时, CW 和 CCW 光具有相同的谐振频率,即谐振简并,这个频率也就是谐振腔的固有频率。而当谐振腔以一定角速度 Ω 旋转时,两束反向传播光均会因 Sagnac 效应而产生一个非互易相移,也就是说 CW 和 CCW 光之间会产生光程差,这一光程差直接反映为两路谐振频率的分裂 Δf ,如(1)式所示

$$\Delta f = 4A\Omega / (\lambda P) \quad (1)$$

式中, A 为环形腔包围的面积, λ 为工作波长, P 为环形腔周长, Ω 为输入角速率。

测量 Δf 并根据(1)式可以推知被测平面相对惯性空间的输入角速度 Ω ,这就是谐振式角速率传感器的基本测量原理。图 1 中放大器 A、伺服回路 Servo#1-2、声光移频器 AOM#1-2 以及相敏检测器 PSD#1-2 等电路器件正是完成控制和测量的外围电路系统,详见文献[2]。

2. 光学系统优化设计

由于谐振式光纤角速率传感器是利用环形谐振腔的谐振峰来敏感输入角速度的,因此要求其谐振峰曲线在工作点附近要有尽可能陡的斜率,在谐振腔自由谱宽一定的情况下,就是要求其谐振的清晰度 (Finesse, F) 要尽可能大^[6],在环形谐振腔中, F 的定义如(2)式

$$F = (f_{p+1} - f_p) / (\mathcal{G}_{1/2}) \quad (2)$$

式中, f_{p+1}, f_p 为两个相邻谐振峰的频率, $\mathcal{G}_{1/2}$ 为谐振峰半高宽频率。

根据谐振腔的基本理论,可以得到其 F 的表达式如(3)式

$$F = \pi \sqrt{2 \sin^{-1} [K_r / (2(1 - K_r)^{1/2})]} \quad (3)$$

$$K_r = 1 - (1 - \gamma_0)(1 - \alpha_0)e^{-2\alpha L} \quad (4)$$

式中, β 为光纤的传输系数, L 为环形腔长, K_r 是谐振腔耦合器 C_3 的最佳耦合比, γ_0 为耦合器 C_3 的插入损耗, α_0 是光纤环的接头损耗, α 为谐振腔单位长度光纤的传输损耗。

由(2), (3), (4)式可以得到光纤环形谐振腔的各个参数对谐振清晰度影响,如图 2 所示。

经过反复设计并结合加工设备的工艺水平,我们采用 PANDA 型单模保偏光纤

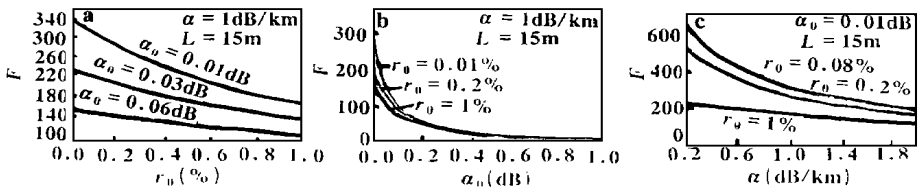


Fig. 2 The influence of parameters in resonator to the F of resonance

加工制成了谐振腔系统,其中腔长 15m, 光纤损耗 3dB/km, 耦合器 C_3 耦合比为 5%, 输入、输出耦合器 C_1 和 C_2 耦合比为 50%, 全保偏耦合器偏振消光比优于 25dB。

二、实验结果

我们根据以上原理和设计建立了一个谐振式光纤角速率传感器谐振系统实验装置,部分如图 1 所示。为了得到谐振曲线并测量其谐振清晰度,首先采用了压电陶瓷作为腔长调制器件,利用正弦波进行谐振频率的扫描,并利用高速信号采集系统以 333kHz 的速率对谐振的波形进行了记录,在腔长扫描频率为 300Hz 的条件下,记录的典型谐振时间曲线如图 3 所示。我们利用谱线宽度小于 100kHz 的 Nd: YAG 激光器得到了 50 左右的清晰度,基本达到了中高分辨率传感器的要求。

在谐振曲线中,我们初步观察到了谐振腔中,两个偏振态同时谐振的情况,并采取了初步措施进行抑制^[8]。同时,两个输入、输出耦合器的背散射效应造成的双路谐振耦合也是谐振系统中应该加以消除的误差因素。

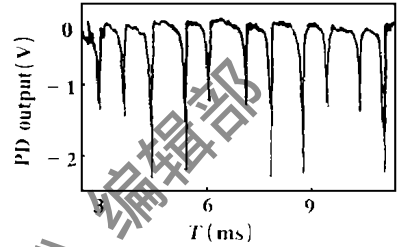


Fig. 3 Recorded resonant curve

三、结 论

对谐振式光纤角速率传感器中谐振系统的实验装置的原理分析和实验研究表明,文中的全保偏光纤环形谐振腔可以达到中高精度分辨率系统的需要,其耦合器耦合系数、光纤环接头损耗和耦合损耗等是影响谐振性能的主要因素。同时,光纤端头和耦合器的背向散射以及谐振腔中多个偏振态存在对谐振系统的影响在测试中已经得到了证实,需要在进一步的实验中采用适当的方法加以消除^[8],使谐振式光纤角速率传感器达到实用的阶段。

参 考 文 献

- 1 Ezeliel, Balsamo S R. A P L, 1977; 30: 478~ 480
- 2 Meyer R E, Ezekiel S, Stowe D W *et al.* Opt Lett, 1983; 8(12): 644~ 646
- 3 Kaiser T J, Cardarelli D *et al.* SPIE, 1990; 1367: 121~ 126
- 4 Iwatsuki K, Hotate K, Higoshiguchi M. Appl Opt, 1986; 25(15): 2606~ 2612
- 5 Takiguchi K, Hotate K. Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring resonator gyro. Proc. of 8th Optical Fiber Sensors Conference, Monterey, CA, 1992: 34~ 37
- 6 Carroll R, Coccoli C D, Cardarelli D *et al.* SPIE, 1986; 719
- 7 Zhang F, Lit J W Y. Optical Society of America, 1988; A5(8): 1347~ 1356
- 8 Takiguchi K, Hotate K. IEEE photonics technology letters, 1991; 3(1): 88~ 90

* * *

作者简介:汤全安,男,1937年11月出生。副教授。长期从事精密仪器控制、光学速率传感器的科研与教学工作。