

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0204-04

90°对接双耦合器保偏光纤谐振腔响应特性测试研究

姚 琼 林惠祖

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙, 410073)

摘要 保偏光纤(PMF)谐振腔是谐振式光纤陀螺的核心元件,在谐振腔中由于偏振耦合引起的偏振波动是陀螺的测量误差的主要来源之一,而 PMF 偏振主轴旋转 90°对接是克服谐振腔偏振波动的有效方法。对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的谐振特性和偏振特性进行了理论分析,采用锯齿波扫描的方法对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的谐振特性和偏振特性进行实验研究,得到理论响应和实验响应曲线。实验测得谐振腔的精细度为 24,谐振深度为 0.9615,两本征偏振态之间的相位间隔为 179.65°,证明了 90°对接双耦合器 PMF 谐振腔的良好偏振特性。

关键词 光纤光学;谐振式光纤陀螺;保偏光纤谐振腔;谐振特性;偏振特性

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0204

Study on Response Characteristics Testing of 90° Docking in Double Couplers Polarization Maintaining Fiber Resonator

Yao Qiong Lin Huizu

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Polarization maintaining fiber (PMF) resonator is the core component of a resonator fiber optic gyroscope. Polarization fluctuation induced by polarization coupling in resonator is one of the main sources of gyroscope's measure error, and 90° docking of fiber polarization axis is an effective way to overcome the polarization fluctuations in resonator. In this paper, resonance characteristics and polarization characteristics of 90° docking in double couplers polarization maintaining fiber resonator are analyzed theoretically to obtain theoretical response curve, then sawtooth scanning method is experimentally used to obtain response curve with 24 finesse, 0.9615 resonant depth and 179.65° phase interval of the two polarization eigenstates. In consequence, good polarization characteristics of 90° docking in double couplers polarization maintaining fiber resonator are proved.

Key words fiber optics; resonator fiber optic gyroscope; polarization maintaining fiber resonator; resonance characteristics; polarization characteristics

1 引 言

谐振式光纤陀螺(R-FOG)是第二代光纤陀螺,利用谐振腔的谐振特性及其在转动时产生的 Sagnac 效应实现对转动角速度的测量^[1]。它利用一个循环的环形谐振腔来增加旋转引起的 Sagnac 效应,检测精度高,动态范围大,可以用较短的光纤、很小的体积实现高灵敏度的转动检测,有着巨大发展潜力^[2]。但是在实际应用中,由于采用高相干光源,谐振式光纤陀螺面临更为艰难的技术挑战,存在

着诸多非互易性噪声影响陀螺的性能,如后向反射和散射、交叉偏振耦合、Faraday 效应和 Kerr 效应等。尤其是由于交叉偏振耦合产生的偏振噪声,它不仅造成信号的衰减,而且还会产生一个寄生的相位差,引起信号漂移^[3]。因此,偏振波动是 R-FOG 中的主要噪声源之一,要获得光纤谐振腔的稳定谐振,还要考虑谐振腔的偏振特性。

为了减少偏振波动引起的光纤谐振腔谐振峰的不稳定和非对称问题,有以下方法被提出:在光纤环内加

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-20

作者简介: 姚 琼(1980—),女,讲师,主要从事光纤技术及其相关方面的研究。E-mail: yqnuadt@yahoo.com.cn

入偏振控制器^[4]；保偏光纤(PMF)构成谐振腔，且在谐振腔入射端加入光纤起偏器^[5]；单偏振单模光纤谐振腔^[6]；偏振轴旋转 90°熔接 PMF 谐振腔^[6~8]；缠绕的单模光纤谐振腔^[9]；由写入光诱导双折射光栅的 PMF 组成的谐振腔^[10]。在目前的技术条件下，采用偏振轴旋转 90°熔接 PMF 谐振腔的方法是比较可行的，它在谐振腔的加工制作上比较容易，不需要在光纤环中增加偏振控制器等光学元件，通过采用专用的高性能光纤熔接机可以将偏振轴对准误差控制在较小的范围内。本文主要对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的响应特性进行理论和实验分析，对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的性能进行测试，得到其响应特性曲线，分析其谐振和偏振特性。

2 90°对接光纤环形腔响应特性分析

光纤环形谐振腔的工作原理与法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔类似，只是其全光纤结构采用低损耗的光纤耦合器代替反射镜。为了改善谐振腔的偏振特性，一般采用在环形腔内增加一个光纤主轴旋转 90°的熔接点的方法，90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的结构如图 1 所示。

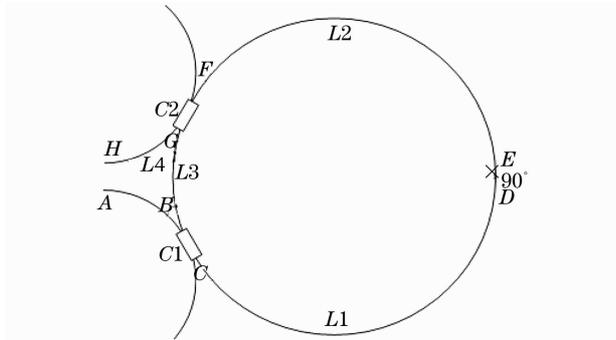


图 1 90°对接双耦合器 PMF 谐振腔的结构图
Fig.1 Structure of 90° docking in double-coupler PMF resonator

采用图 1 的结构，尽管光纤存在两种偏振模式，但是谐振腔已变为单偏振模式。光波沿环形腔传播一周的完整光程由两个部分组成：一部分沿环形腔中的快轴模式传播，另一部分沿环形腔的慢轴模式传播。对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的透射响应进行分析，假设环形腔没有传播损耗且采用了两个相同的耦合器，则光纤环形腔的精细度为

$$F = \frac{3}{C}, \quad (1)$$

式中 C 为两个相同耦合器的低耦合率。由上分析，如果两个低耦合率的耦合器具有完全相同的耦合

率，而谐振腔又没有损耗，那么谐振腔具有非常高的精细度。但是，实际上，在环形谐振腔中总存在损耗和衰减，降低了光纤环形腔的精细度。同时，光纤谐振腔的精细度还受光源线宽和耦合器性能参数的影响，光源线宽越窄，耦合器损耗越小，所能得到的光纤谐振腔的精细度就越高。

若光纤偏振主轴 90°精确对准，光以 x 偏振方向从 A 端口入射，在 H 端口出射光形成了多波束干涉，由于相邻出射光的偏振方向不一致，所以它们并不产生干涉，只有相互间隔一个的出射光束才产生干涉。经过分析可得，两 x 偏振方向出射光的干涉光束之间的光程差为

$$[n_x(L_3 + L_1) + n_y L_2] + [n_y(L_3 + L_1) + n_x L_2] = (n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3), \quad (2)$$

两 y 偏振方向出射光的相邻干涉光束之间的光程差为

$$[n_y(L_3 + L_1) + n_x L_2] + [n_x(L_3 + L_1) + n_y L_2] = (n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3), \quad (3)$$

由(2),(3)式可知，无论是 x 偏振方向的多波束干涉还是 y 偏振方向的多波束干涉，它们干涉尖峰的间距即自由谱宽度(FSR) W_{FSR} 是一样的，用光程表示均为 $(n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3)$ ，它们对应的透射响应可表示为

$$S = \frac{1}{1 + f \sin^2 \left[\frac{\pi(n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3)}{\lambda} \right]}, \quad (4)$$

式中 $(n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3)$ 为传播一圈的光程，系数 $f = 4(1 - C)/C^2$ 。当沿环形谐振腔传播一圈的光程 $(n_x + n_y)(L_1 + L_2 + L_3)$ 等于光波长的整数倍时，产生谐振效应，光被透射出来。谐振相应的周期称为自由谱范围 Δt_{free} ，透射峰的半峰全宽为 Δt_{FWHM} ，则它们与光纤环形腔的精细度 F 的关系为

$$F = \Delta t_{free} / \Delta t_{FWHM}. \quad (5)$$

综上所述，90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔有两组干涉谐振峰，对应于两个本征偏振态 ESOP1 和 ESOP2，它们的自由谱宽度相同，且可以通过制作过程中对相应光纤长度的控制使得对于每个本征偏振态，其传输一周的损耗相同，相移则相差 π ，这时两谐振峰之间的相位间隔将稳定为 π ，谐振频率间隔则稳定为 $W_{FSR}/2$ 。由于两本征偏振态谐振峰之间的频率间隔稳定，且偏振态 ESOP2 的谐振峰正好位于偏振态 ESOP1 谐振峰间隔中间对称的位置，光纤谐振腔产生稳定的谐振波形，ESOP2 的谐

振波形不会影响 ESOP1 谐振波形的对称性, 两本征偏振态 ESOP1 和 ESOP2 的谐振峰相对位置和

谐振频率间隔如图 2 所示。

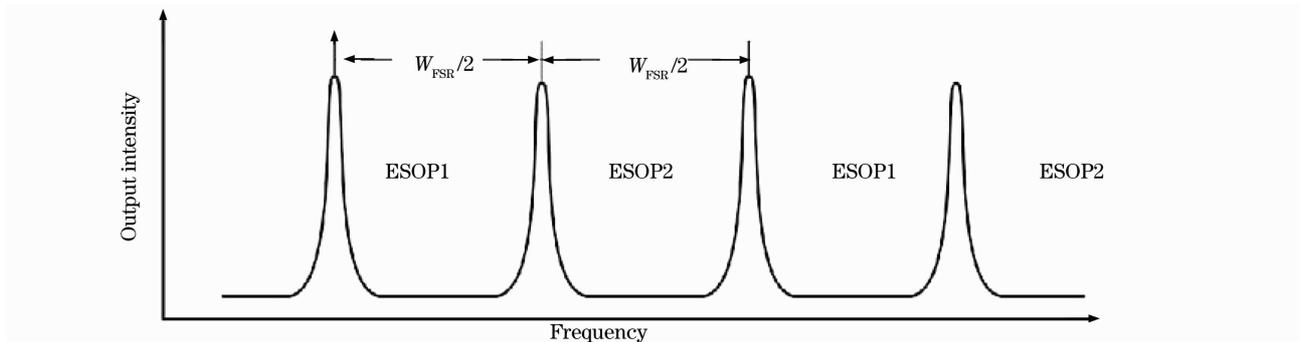


图 2 90° 对接 PMF 谐振腔 ESOP1 和 ESOP2 的谐振频率间隔

Fig. 2 Frequency interval of ESOP1 and ESOP2 in 90° docking double-coupler PMF resonator

3 90° 对接双耦合器 PMF 谐振腔响应特性测试

在进行 90° 对接双耦合器 PMF 谐振腔性能测试之前, 采用白光干涉偏振耦合测试的方法^[11,12], 对 90° 对接误差进行了优化处理以保证谐振腔的良好特性, 得到 90° 对接角度误差 0.37° 的保偏光纤谐振腔。保偏光纤谐振腔性能测试系统如图 3 所示, 光源采用高相干光纤激光器, 通过内调制可以实现对激光器输出光频的快速调制。被测 PMF 谐振腔由两个分光比 3% 的 2×2 耦合器组成, 同时为了改善输入光波的偏振特性, 在谐振腔的输入端加入了 PMF 偏振器, 光纤偏振器消光比 30 dB。高相干光纤激光器的输出光从 1 端口入射 3 端口出射, 进入光电探测器后, 由数字示波器进行观察输出, 可以观察其透射谱。

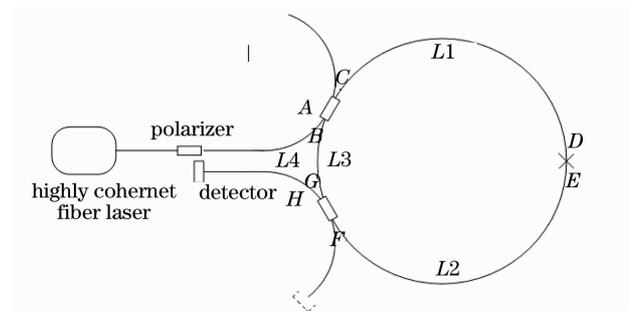
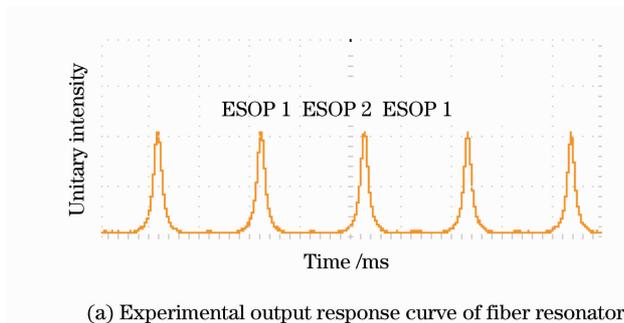


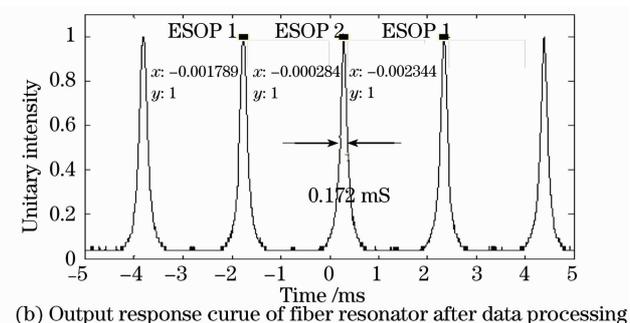
图 3 光纤谐振腔响应特性测试实验系统

Fig. 3 Response characteristics testing system of fiber resonator

通过对光纤激光器进行锯齿波频率扫描, 用数字示波器观察记录探测器的信号输出, 得到了谐振腔的输出响应曲线, 如图 4 (a) 所示, 归一化处理后如图 4 (b) 所示, 图中纵坐标为归一化强度值。



(a) Experimental output response curve of fiber resonator



(b) Output response curve of fiber resonator after data processing

图 4 光纤谐振腔输出响应曲线

Fig. 4 Output response curve of fiber resonator

对于偏振轴旋转 90° 对接光纤谐振腔, 将出现两组谐振波形, 分别对应于两个本征偏振态, 相邻谐振峰的间隔为 $W_{FSR}/2$ 。由图 4 可以观察到对应于不同本征偏振态的两组谐振波形, 且 ESOP1 基本

位于两个 ESOP2 的中间位置, 与理论分析得到的响应曲线相一致。根据实验结果对 PMF 谐振腔的谐振特性和偏振特性进行分析。

3.1 谐振特性

由图 4 (b)可见, $I_{\max}=1, I_{\min}=0.03846$, 谐振峰的高度由谐振腔的谐振深度表示

$$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} = 1 - 0.0385 = 0.9615.$$

谐振半峰全宽处对应光强值为 $1 - \rho/2 = 0.5192$, 对应时间差为 0.172 ms, 谐振腔自由谱宽对应时间差为 4.112 ms, 根据(5)式, 则谐振腔的精细度为

$$F = \frac{4.112}{0.172} = 24.0.$$

3.2 偏振特性

由于采用了偏振轴旋转 90°对接的方法, 光纤谐振腔中两个本征偏振态产生两组谐振波形。对 ESOP1 和 ESOP2, 相邻谐振峰之间的时间差为 4.112 ms; ESOP1 谐振峰和相邻的 ESOP2 谐振峰之间的时间差分别为 2.052 ms 和 2.060 ms。

理想情况下, 两本征偏振态相邻谐振峰之间的频率间隔均等于 $W_{\text{FSR}}/2$, 单程相移均等于 π 。当光纤谐振腔中存在耦合器偏振交叉耦合和偏振轴熔接对准误差时, 频率间隔不再等于 $W_{\text{FSR}}/2$ 。由图 4(b)可以算出, ESOP1 谐振峰和相邻的 ESOP2 谐振峰之间相位间隔为

$$\phi_{\text{sep}} = \frac{2.052}{4.112} \cdot 2\pi = 0.998\pi = 179.65^\circ.$$

由计算得到 179.65°的相位间隔, 即对应于 0.35°的相位间隔误差, 两本征偏振态的相对位置最大移动 0.2%的 FSR。可见 90°对接的 PMF 谐振腔具有良好的偏振特性。

4 结 论

主要对 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔响应特性进行分析, 首先从理论上分析了 90°对接的双耦合器 PMF 谐振腔的响应特性, 得到两个本征偏振态稳定且对称的理想响应特性曲线。进而对 90°对接的 PMF 谐振腔的响应特性进行测试, 得到了的实验响应曲线, 分析其谐振和偏振特性, 得到谐振精细度为 24, 谐振深度为 0.9615 和两本征偏振态相位间隔 179.65°, 证明了 90°对接的双耦合器 PMF

谐振腔具有良好的偏振特性。

参 考 文 献

- H. C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Zhang Guicai, Wang Wei Transl.. Beijing: National Defense Industry Press, 2002
H. C. Lefevre 著. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王巍译, 北京: 国防工业出版社, 2002
- Zhang Xulin, Ma Huilian, He Shijin *et al.*. Recent progress on resonator fiber optic gyro[J]. *Study on Optical Communications*, 2003, (2): 58~62
张旭琳, 马慧莲, 何时进 等. 谐振式光纤陀螺的研究进展[J]. 光通信研究, 2003, (2): 58~62
- Zhang Xulin, Zhou Kejiang. Analysis of resonator fiber optic gyroscope[J]. *Semiconductor. Optoelectronics*, 2009, **30**(3): 464~468
张旭琳, 周柯江. 谐振式光纤陀螺的系统分析[J]. 半导体光电, 2009, **30**(3): 464~468
- G. McRobbie, I. Andonovic, B. Culshaw. Effect on gyro drift with an in-loop polarizer in an optical passive ring resonator[C]. *SPIE*, 1991, **1585**: 136~152
- K. Takiguchi, K. Hotate. Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization axis in the polarization-maintaining fiber resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, **10**(4): 514~522
- K. Takiguchi, K. Hotate. Reduction of a polarization-fluctuation-induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, **11**(10): 1687~1693
- L. K. Strandjord, G. A. Sanders. Passive stabilization of temperature dependent polarization errors of a polarization-rotating resonator fiber optic gyroscope[C]. *SPIE*, 1995, **2510**: 81~91
- L. K. Strandjord, G. A. Sanders. Resonator fiber optic gyro employing a polarization-rotating resonator [C]. *SPIE Proceedings*, 1991, **1585**: 163~172
- K. Hotate, T. Kurakake. Manner to reduce the drift due to polarization fluctuation in a resonator fiber optic gyro composed of a single mode fiber[C]. *SPIE*, 1993, **2070**: 234~245
- C. X. Shi, K. Hotate. Bias of a resonator fiber optic gyro composed of a polarization-maintaining fiber ring resonator with the photoinduced birefringent grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(9): 1853~1857
- Tang Feng. Testing and Application of Polarization Coupling in Polarization Maintaining Fiber Using White Light Interferometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 12
唐 峰. 白光干涉法保偏光纤偏振耦合测试及其应用[D]. 天津: 天津大学, 2005. 12
- Zhang Hongxia, Zhang Yimo, Jia Dagong *et al.*. White light scanning interferometer used for inspecting position of polarization coupling in polarization maintaining polarization coupling in polarization maintaining fiber[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 305~308
张红霞, 张以谟, 贾大功 等. 白光扫描干涉仪用于保偏光纤偏振耦合检测[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(3): 305~308