

文章编号: 0253-2239(2010)10-2864-05

# 谐振式光纤陀螺保偏光纤谐振腔 90°对接 误差控制研究

林惠祖 姚琼 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 保偏光纤谐振腔交叉偏振耦合引起的偏振波动是谐振式光纤陀螺的主要噪声源之一,保偏光纤偏振主轴旋转 90°对接是克服偏振波动的有效方法,其对接角度误差大小对陀螺噪声抑制效果有重要影响。为此利用迈克耳孙(Michelson)白光光纤干涉仪偏振耦合测试方法,从理论上对双耦合器保偏光纤谐振腔的 90°对接误差进行了分析,得到迈克耳孙白光干涉仪输出的干涉交流项公式和干涉波形,进而计算得到双耦合器保偏光纤谐振腔的 90°对接误差角度。对双耦合器的保偏光纤谐振腔 90°对接角度误差控制进行了实验研究,实现了 0.37°的角度对接误差。

**关键词** 光纤光学;谐振式光纤陀螺;保偏光纤谐振腔;偏振耦合;迈克耳孙白光干涉仪

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2864

## Study on 90° Docking Error Control in Polarization Maintaining Fiber Resonator of Resonant Fiber Optic Gyroscope

Lin Huizu Yao Qiong Hu Yongming

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

**Abstract** Polarization fluctuation in polarization maintaining fiber (PMF) resonator caused by cross-polarization coupling is one of the major noise sources in resonant fiber optic gyroscope. Polarization axis 90° butt joint is an effective way to overcome the polarization fluctuation, and the size of butt docking error has important effect on the gyroscope noise suppression effects. The 90° butt joint error control of double-coupler PMF resonator based on Mickelson white-light interferometer is studied theoretically and obtains the interference formula of polarization mode, and then the butt joint error degree. Finally, 90° docking error control in two-coupler PMF resonator is studied in experiment, and the experimental butt joint error of 0.37° is obtained.

**Key words** fiber optics; resonant fiber optic gyroscope (R-FOG); polarization maintaining fiber(PMF) resonator; polarization coupling; Michelson white-light interferometer

### 1 引 言

光纤陀螺是基于光学萨尼亚克(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,可用于不同精度应用场合,而保持较高的性价比。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<sup>[1]</sup>。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,有着巨大的发展潜力<sup>[2]</sup>。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,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,因此,偏振波动是R-FOG中的主要噪声源之一。

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,提出了在光纤环内加入偏振

收稿日期: 2009-11-30; 收到修改稿日期: 2010-03-03

作者简介: 林惠祖(1985—)男,博士研究生,主要从事光纤传感技术及其相关等方面的研究。

E-mail: linhuizu2@126.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: huyongming@gfkd.com

控制器<sup>[3]</sup>；用保偏光纤构成谐振腔，且在谐振腔入射端加入光纤起偏器<sup>[4]</sup>；单偏振单模光纤谐振腔<sup>[5]</sup>；偏振轴旋转 90°熔接保偏光纤谐振腔<sup>[6,7]</sup>；缠绕的单模光纤谐振腔<sup>[8]</sup>；由写入光诱导双折射光栅的保偏光纤组成的谐振腔<sup>[9]</sup>等解决方案。在目前的技术条件下，采用偏振轴旋转 90°熔接保偏光纤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，但是目前没有具体方法对其对接角度误差进行测量和控制。

国内从 20 世纪 90 年代起就开始了保偏光纤偏振耦合问题的研究，清华大学<sup>[10]</sup>、上海交通大学<sup>[11]</sup>、天津大学<sup>[12,13]</sup>、电子科技大学<sup>[14]</sup>和中国科学院<sup>[15]</sup>等都先后开展了保偏光纤偏振耦合测试及其应用的研究，并将其应用于光纤陀螺光纤环检测、分布式传感等工程实际中。为了改善保偏光纤谐振腔的性能，提高陀螺精度，本文利用迈克耳孙白光光纤干涉

仪对光纤偏振轴旋转 90°对接时的保偏光纤谐振腔的偏振耦合进行测量控制以减小 90°对接角度误差，为制作出高精度、高谐振深度和良好偏振特性的保偏光纤腔，为改善谐振式光纤陀螺性能提供技术支持。

## 2 原 理

### 2.1 迈克耳孙白光光纤干涉仪偏振耦合测试系统

迈克耳孙白光干涉仪利用宽光谱、相干长度很短的光源，通过干涉现象来实现对微小参量的高精度测量<sup>[18,19]</sup>。其结构简单、稳定性好和空间分辨率高，对光源功率波动不敏感，可进行大范围绝对测量。近年来，采用低相干光源的白光干涉技术取得了较大发展，利用白光扫描干涉法进行保偏光纤偏振耦合检测，可以成为检测保偏光纤参数和技术指标的一种有效手段。迈克耳孙白光光纤干涉仪偏振耦合测试系统结构如图 1 所示。

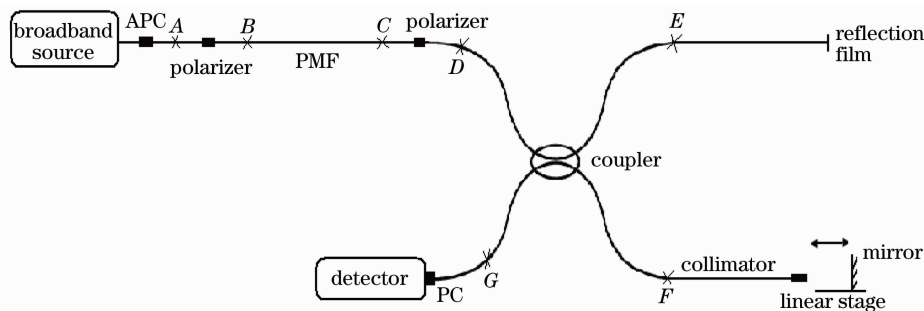


图 1 白光光纤迈克耳孙干涉仪偏振耦合测试系统结构图

Fig. 1 Structure of polarization coupling testing system based on white-light fiber Michelson interferometer

宽谱光源出射光经过保偏光纤偏振器耦合进保偏光纤中，在保偏光纤中产生偏振耦合后经保偏光纤偏振器投影到同一偏振方向，经过耦合器分成两束光进入光纤干涉仪的两臂中，一束光通过光纤反射膜反射回耦合器，另一束光通过准直器准直后通过反射镜反射回耦合器，通过直线电动台的移动来补偿扫描光程差，两束光干涉输出后进入光电探测器，通过处理电路后经示波器显示输出，谐振式光纤陀螺保偏光纤谐振腔 90°对接误差是通过 90°对接时的保偏光纤谐振腔的偏振耦合测试来实现角度误差的控制。

### 2.2 双耦合器保偏光纤谐振腔 90°对接误差控制理论分析

90°对接的双耦合器保偏光纤谐振腔的结构如图 2 所示，其中 A, B, C, D, E, F, G, 和 H 是为分析方便定义的节点， $L_1$  为耦合器 C1 和 90°对接点的距

离， $L_2$  为耦合器 C2 和 90°对接点的距离， $L_3$  为耦合器 C1 和耦合器 C2 的距离。用 90°对接的双耦合器保偏光纤谐振腔代替图 1 中的 PMF，即将图 2 中的 A 点与图 1 中的 B 点连接，将图 2 中的 H 点与图 1 中的 C 点连接，从而将 90°对接的双耦合器保偏光纤谐振腔接入测试系统中。设  $x$  为起偏方向且为快轴方向，光从 A 点进入，振幅为  $A_0$ ，经耦合器 C1 产生第一次偏振耦合，在光纤环的 90°熔接点产生偏振耦合后两偏振方向互换后传到耦合器 C2，再次耦合后传到 H 点出射并将两个偏振方向投影到同一偏振方向。设在传输过程中光能没有损耗，耦合器 C1 的偏振耦合系数为  $h_{C1}$ ，耦合器 C2 的偏振耦合系数为  $h_{C2}$ ，由光纤环 90°对接误差引入的偏振耦合系数为  $h_{\theta}$ 。

通过分析，得到 H 点出射光的偏振态及各个偏振态之间的光程差如图 3 所示，其中  $E_{rH1}$ ,  $E_{rH2}$ ,  $E_{rH3}$ ,

$E_{yH1}$  和  $E_{yH2}$  分别为  $H$  点处对应波列振幅的大小。

光从  $H$  点出射后,通过偏振器将  $x$  和  $y$  方向的各个种偏振分量以  $\theta$  角投影至同一偏振态( $\theta$  为  $x$  偏振方向与投影主轴的夹角),将会同时存在 5 个波列,其各个波列之间的相位差如图 4 所示。

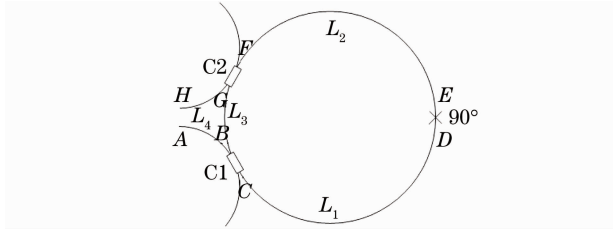


图 2 90°对接双耦合器保偏光纤谐振腔的结构图

Fig. 2 Structure of 90° butt joint in double-coupler

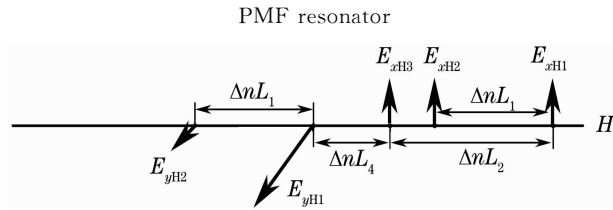


图 3 光传至  $H$  点时的偏振态

Fig. 3 Polarization state of light at  $H$  point

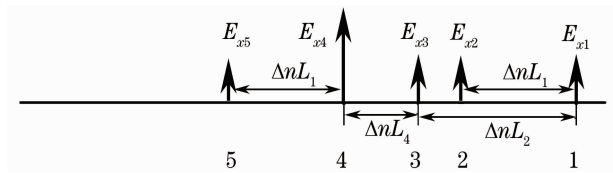


图 4 投影后的波列分布

Fig. 4 Distribution of the wave train after projection

图 4 各波列对应的振幅大小分别为

$$E_{x1} = \sqrt{h_{\theta}(1-h_{c1})(1-h_{c2})} \cos \theta K A_0,$$

$$E_{x2} = \sqrt{(1-h_{\theta})(1-h_{c2})h_{c1}} \cos \theta K A_0,$$

$$E_{x3} = \sqrt{(1-h_{\theta})(1-h_{c1})h_{c2}} \cos \theta K A_0,$$

$$E_{x4} = \sqrt{(1-h_{\theta})(1-h_{c1})(1-h_{c2})} \sin \theta K A_0,$$

$$E_{x5} = \sqrt{h_{c1}h_{\theta}(1-h_{c2})} \sin \theta K A_0.$$

式中  $K$  为耦合器的分光比,  $A_0$  为入射光初振幅。上述 5 个波列进入迈克耳孙干涉仪中通过光程差补偿产生干涉,形成干涉波形。由于  $E_{x2}$  和  $E_{x3}$  之间距离非常接近,在干涉图样分析中只列出其中一个,另外考虑到干涉峰之间的大小及位置关系,在五个干涉位置会出现干涉现象,如图 5 所示。

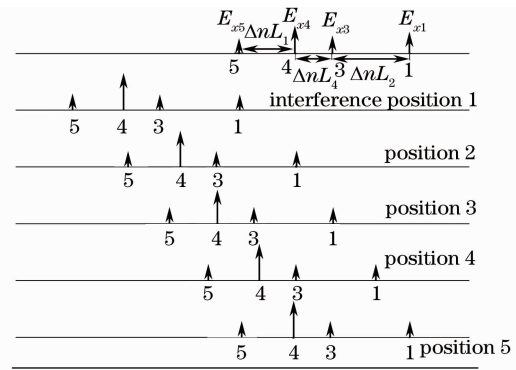


图 5 保偏光纤谐振腔输出光发生干涉的过程

Fig. 5 Interference process of output light of

PMF resonator

总的交流项的强度公式可表示为

$$I_{AC} = K^2 A_0^2 \left[ (1-h_{c2})h_{\theta} \sqrt{(1-h_{c1})h_{c1}} \cos \theta \sin \theta K^2 A_0^2 \gamma(\Delta z - \Delta nL_1 - \Delta nL_2 - \Delta nL_4) \times \right. \\ \left. \cos(k\Delta z - k\Delta nL_1 - k\Delta nL_2 - k\Delta nL_4) + (1-h_{c1})(1-h_{c2}) \sqrt{h_{\theta}(1-h_{\theta})} \cos \theta \sin \theta K^2 A_0^2 \times \right. \\ \left. \gamma(\Delta z - \Delta nL_2 - \Delta nL_4) \cos(k\Delta z - k\Delta nL_2 - k\Delta nL_4) + (1-h_{c1}) \sqrt{(1-h_{c2})(1-h_{\theta})} h_{c2} h_{\theta} \times \right. \\ \left. \cos^2 \theta K^2 A_0^2 \gamma(\Delta z - \Delta nL_2) \cos(k\Delta z - k\Delta nL_2) + (1-h_{c1})(1-h_{\theta}) \sqrt{(1-h_{c2})h_{c2}} \cos \theta \sin \theta K^2 A_0^2 \times \right. \\ \left. \gamma(\Delta z - \Delta nL_4) \cos(k\Delta z - k\Delta nL_4) + (1-h_{c1})(1-h_{c2})(1-h_{\theta}) \sin^2 \theta K^2 A_0^2 \gamma(\Delta z) \cos(k\Delta z) \right]. \quad (1)$$

式中  $\gamma(\Delta x)$  为光源的自相干函数,由(1)式得到迈克耳孙光纤干涉仪的干涉输出中包含 5 个干涉交流项,具体干涉波形如图 6 所示,分别对应于不同的偏振耦合分量,各个干涉交流项的干涉位置和强度与偏振耦合点的位置和强度密切相关,通过对各个干涉交流项干涉位置和强度的分析即可得到各耦合点的位置和耦合强度信息。

由图 6 可以得到每个干涉项的光程差的大小,即可以得到  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_4$  的大小,求得耦合点的位置。

另外由干涉公式得耦合次模和偏振主模的振幅比为

$$\eta_1 = \frac{A_1^2}{A_5^2} = \frac{h_{\theta}}{1-h_{\theta}} \sqrt{\frac{h_{c1}}{1-h_{c1}}} \cot \theta, \\ \eta_2 = \frac{A_2^2}{A_5^2} = \sqrt{\frac{h_{\theta}}{1-h_{\theta}}} \cot \theta, \\ \eta_3 = \frac{A_3^2}{A_5^2} = \sqrt{\frac{h_{\theta}}{1-h_{\theta}}} \sqrt{\frac{h_{c2}}{1-h_{c2}}} \cot^2 \theta, \\ \eta_4 = \frac{A_4^2}{A_5^2} = \sqrt{\frac{h_{c2}}{1-h_{c2}}} \cot \theta. \quad (2)$$

式中  $A_1, A_2, A_3, A_4$  为耦合次模的振幅,  $A_s$  为耦合主模的振幅, 当  $\theta$  固定时, 通过干涉波形就可以求得  $h_\theta, h_{c1}$  和  $h_{c2}$  的大小。且当  $h_\theta$  变小时,  $\eta_1, \eta_2$  和

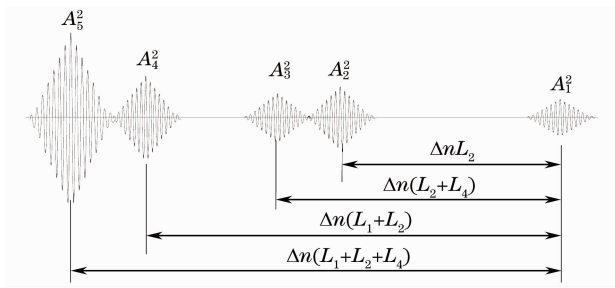


图 6 保偏光纤谐振腔偏振耦合干涉图  
Fig. 6 Interference pattern of polarization coupling in PMF resonator

$\eta_3$  均减小, 其中以  $\eta_1$  变化最快, 反应在干涉波形上为其对应的干涉峰变小。因此, 利用这一原理, 可以对 90°对接时的干涉波形进行测量, 尽量减小  $\eta_1, \eta_2$

和  $\eta_3$  对应干涉峰的大小, 即可以得到最优的 90°对接角度, 以减小保偏光纤熔接机进行 90°熔接时由于保偏光纤对轴误差引入的 90°对接误差, 提高保偏光纤谐振腔的性能, 进而提高陀螺精度。另外, 在已知投影角度的情况下, 由  $\eta_2$  和 (2) 式可以计算得到由于 90°对接误差引起的交叉耦合系数  $h_\theta$ 。

### 3 实 验

如图 2 所示, 光从 A 入射, H 出射, 耦合器 1 分光比 2.9%, 耦合器 2 分光比 3%, 由于采用的是小分光比的双耦合器结构, 所以为了增大出射光功率, 测试光源采用放大自发辐射 (ASE) 光源出射经掺铒光纤入大器 (EDFA) 放大输出的组合光源, 直线电动台整步运行距离为 12.5  $\mu\text{m}$ 。使用保偏光纤熔接机进行光纤偏振轴 90°对接, 通过仔细调节, 测量对接时 90°误差引起的偏振耦合, 得到干涉图如图 7(a) 所示。

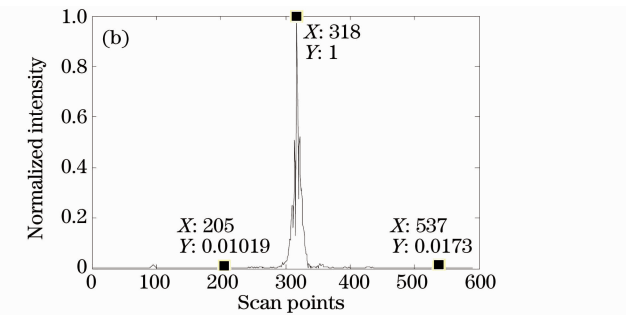
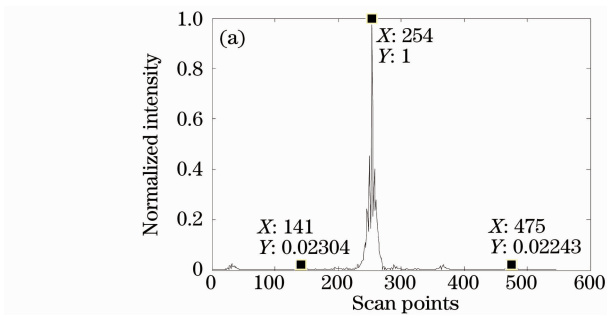


图 7 90°对接偏振耦合测试结果。(a)人眼测试结果, (b)微调后测试结果  
Fig. 7 Polarization coupling testing results of 90° butt joint. (a) Testing result using eyes, (b) testing result after fine tuning

图 7 (a) 所示干涉图与 2.2 节双耦合器偏振耦合测试理论分析得到的干涉图相一致, 只是由于  $L_4$  较小, 使得 2.2 节干涉图中的  $A_2^2$  和  $A_3^2$  及  $A_1^2$  和  $A_4^2$  对应的干涉峰重合。采用偏振耦合测试的方法控制 90°对接误差就是通过调整 90°对接精度, 使得耦合次峰与偏振主峰的比值尽可能的小。因此, 在上述实验的基础上, 微调对接角度, 再次测量 90°对接误差引起的偏振耦合, 得到干涉图如图 7 (b) 所示, 图 7 (b) 中与  $A_1^2$  项和  $A_2^2$  项对应的干涉峰与图 7 (a) 相比已有所减小。再次微调对接角度, 测量得到干涉图如图 8 所示。

接角度误差引起的耦合系数为 0.000042, 再根据耦合系数与对接角度误差关系  $h = 1/(1 + \cot^2 \alpha)$ , 式中  $\alpha$  为对接误差角度, 可求得对接误差角度为 0.37°, 而由图 7 (a) 计算得到的熔接机仔细调节直接对准的误差角度为 1.32°。

图 8 中与  $A_1^2$  项即 90°对接误差引起的偏振耦合干涉项对应的干涉峰已基本消失,  $A_2^2$  项也较小, 故此时的对接角度是比较理想的对接角度, 此时熔接该点, 熔接损耗为 0.06 dB。根据  $A_2^2$  项耦合次峰和偏振主峰的比值 0.006458, 由 (2) 式可计算得由于对

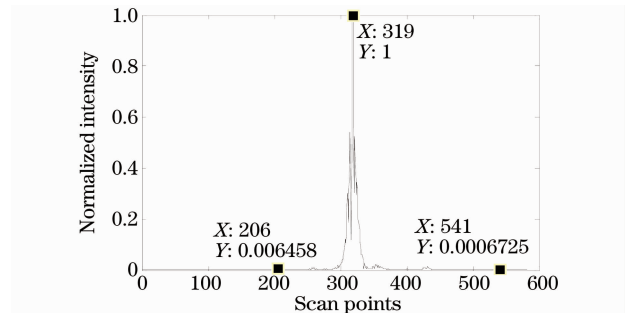


图 8 微调后得到的最小 90°对接误差偏振耦合测试结果  
Fig. 8 Polarization coupling testing result with the smallest 90° butt joint error after fine tuning

## 4 结 论

为了减小谐振式光纤陀螺谐振腔  $90^\circ$  对接角度误差,提高陀螺精度,从理论上分析了双耦合器保偏光纤谐振腔中各个耦合点的偏振幅度和相位,对它们的相互干涉位置进行讨论,得到理论上的干涉图像,进而利用迈克耳孙白光光纤干涉仪偏振耦合测试方法对谐振式光纤陀螺保偏光纤谐振腔  $90^\circ$  对接过程进行检测,对其  $90^\circ$  对接角度误差进行控制,获得对接误差  $0.37^\circ$  的保偏光纤谐振腔。

### 参 考 文 献

- H. C. Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. Zhang Guicai *et al.*. Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2002  
H. C. Lefevre. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才等译. 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 Opt. Commun.*, 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]. 光通讯研究, 2003, (2): 58~62
- 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]. *J. Lightwave Technol.*, 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]. *J. Lightwave Technol.*, 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*, 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]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(9): 1853~1857
- Tang Quanan, Ma Xinyu. Study of polarization maintaining fiber ring resonator[J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(5): 265~267  
汤全安, 马新宇. 保偏光纤环形谐振腔研究[J]. 激光技术, 1998, **22**(5): 265~267
- Li Jiachen, Zhang Yanhua. Polarization fluctuation analyse in passive ring resonator fiber optical gyro[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1999, **33**(10): 1307~1309  
李佳程, 张炎华. 被动式谐振腔光纤陀螺的偏振分析[J]. 上海交通大学学报, 1999, **33**(10): 1307~1309
- Tang Feng. Testing and Application of Polarization Coupling in Polarization Maintaining Fiber Using White Light Interferometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005  
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
- Zhang Hongxia, Zhang Yimo, Jia Dagong *et al.*. White light scanning interferometer used for inspecting position of 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
- Xu Tianhua, Tang Feng, Jing Wencai *et al.*. Influence of polarization extinction ratio on distributed polarization coupling detection[J]. *Optoelectron. Lett.*, 2008, **4**(4): 292~294
- Zhou Xiaojun, Gong Junjie, Liu Yongzhi *et al.*. Analysis of white-light interference distributed optic fiber sensor by polarized modes coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 605~608  
周晓军, 龚俊杰, 刘永智 等. 白光干涉偏振耦合分布式光纤传感器分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(5): 605~608
- Yuan Shi, Li Haifeng. Application of FPGA in polarization coupling analyzer[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2004, (11): 17~19  
袁 实, 李海峰. FPGA 在偏振耦合测试仪中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2004, (11): 17~19
- Zhang Hongxia, Liu Haitao, Jing Wencai *et al.*. Research of stress sensing based on measurement of polarization coupling in polarization maintaining fiber[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1442~1445  
张红霞, 刘海涛, 井文才 等. 保偏光纤偏振耦合应力传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2008, **19**(11): 1442~1445
- Yao Jianyong, Zhang Sen, Wang Zhen *et al.*. Investigation of fiber-optic Michelson interferometer system[J]. *Study on Opt. Commun.*, 2007, (2): 45~48  
姚建永, 张 森, 王 臻 等. 光纤 Michelson 干涉仪系统的研究[J]. 光通讯研究, 2007, (2): 45~48
- Li Qiuzhu, Liu Yi, Niu Kangkang *et al.*. Reconstruction of the 3D surface profile of micro device based on white-light interference measurement technology[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2009, **23**(3): 201~204  
李秋柱, 刘 毅, 牛康康 等. 基于白光干涉测量技术的微器件三维形貌重构[J]. 测试技术学报, 2009, **23**(3): 201~204