

文章编号: 1673-1255(2008)04-0031-04

## 全光纤陀螺光学部件的研究与实现

李会军, 孙力军

(1. 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

**摘要:**介绍了全光纤陀螺的基本工作原理,分析了全光纤陀螺各光学部件的关键技术,然后探讨了搭建光路时部分难点的一些解决办法.作为一种新型的角度传感器,实用型低精度开环光纤陀螺系统采用了全保偏的设计方案,偏移调制采用正弦信号来调制压电陶瓷调制器.

**关键词:**光纤陀螺; Sagnac 效应; 相位调制器; 保偏

**中图分类号:** TN253      **文献标识码:** A

## Research and Realization on Optical Component of All Optic Fiber Gyroscope

LI Hui-jun<sup>1</sup>, SUN Li-jun<sup>2</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;  
2. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The basic working principle of all optic fiber gyroscope is introduced, and the key techniques of each optical component are analyzed, some important resolutions for constructing optical way are discussed. As a new type of angle sensor, polarization-maintaining technology is used in the practical low measurement precision open-loop optic fiber gyroscope, and a PZT modulator is modulated by sine signal at shifting modulation.

**Key words:** optic fiber gyroscope; sagnac effect; phase modulator; polarization maintaining

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的角速度传感器.它以激光为光源,通过测量沿光纤线圈顺时针和逆时针方向传播的 2 束光的光程差,从而得到光纤线圈的转速<sup>[1]</sup>.由于它具有测量精度高、动态范围大、启动时间短、体积小、质量轻、易集成等特点,使其在卫星定位、导弹制导、飞机导航等军事和民用领域具有广阔的应用前景.

已进入实用化阶段的光纤陀螺大都是干涉式的,主要有全光纤陀螺(开环光纤陀螺)和集成光纤陀螺(闭环光纤陀螺)2 种.全光纤陀螺在输出动态范围和标度因子线性度等方面都逊色于集成光纤陀螺,但它的结构简单、成本低于集成光纤陀螺,因而在一些精度要求相对较低的应用场合具有很强的竞争力.全光纤陀螺的光学部件主要包括光源(SLD)、光电探测器、耦合器、偏振器、PZT(压电陶瓷)相位

调制器、光纤线圈等.主要对全光纤陀螺光路部件的搭建及其关键技术逐一进行分析和探讨.

## 1 工作原理概述

## 1.1 基本原理

干涉式全光纤陀螺的基本构成是一个环形双光束干涉仪,它是基于光速恒定性原理和光学上的 Sagnac 效应. Sagnac 效应是在同一闭合环行光路中,沿顺时针方向和逆时针方向传播的 2 束光,当光回路有转动时,将产生与转动角速度  $\Omega$  成正比的相位差,如图 1 所示.容易推导出相位差  $\Delta\varphi$  与转动角速度  $\Omega$  存在如下简单的线性关系<sup>[2]</sup>

收稿日期: 2008-06-04

**作者简介:**李会军(1976-),男,重庆市人,硕士,助理工程师,主要研究方向为光纤通信和光纤传感技术;孙力军(1965-),男,重庆市人,硕士,研究员,主要研究方向为光通信和光电检测技术.在国内外学术刊物发表论文多篇,并且多篇被 EI 收录.

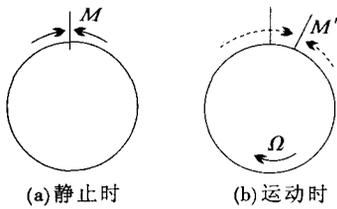


图 1 在环形干涉仪中的 Sagnac 效应

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi LR}{\lambda c} \Omega \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为光波的工作波长;  $c$  为真空中的光速;  $L$  为光纤环的总长度;  $R$  为光纤环的半径. 由于光纤环转动产生的相移和光纤环的转速有严格的线性关系, 所以可以通过检测干涉仪的相移而准确得到光纤环的转速信号, 这就是干涉式全光纤陀螺的转速检测原理.

### 1.2 理论分析

全光纤陀螺光学部分是一个 Sagnac 干涉仪, 其干涉输出信号为

$$I(t) = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m \sin(\omega_m t))] \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为光纤陀螺干涉光强;  $\varphi_s$  为 Sagnac 相移 ( $\varphi_s = K \cdot \Omega$ ,  $\Omega$  为输入角速度;  $K$  为陀螺标度因数);  $\varphi_m \sin(\omega_m t)$  为压电陶瓷相位调制器产生的正弦相位调制;  $\varphi_m$  为相位调制深度;  $\omega_m$  为正弦调制频率.

用 Bessel 函数展开, 得到

$$I = I_0 [1 + \cos\varphi_s J_0(\varphi_m)] + I_0 \sin(\varphi_s) \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\varphi_m) \sin((2n-1)\omega_m t) + I_0 \cos\varphi_s \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\varphi_m) \cos((2n)\omega_m t) \quad (3)$$

可见, 陀螺输出信号中包含各次谐波分量, 奇次谐波幅度与  $\sin(\varphi_s)$  成正比, 偶次谐波则与  $\cos(\varphi_s)$  成正比<sup>[3]</sup>. 一般  $1 < \varphi_m < 3$ , 由图 2 中贝赛尔函数随工作点(相位调制深度)  $\varphi_m$  的函数变换可知, 信号中高于 4 次的高次谐波幅度可以忽略不计而只考虑低频分量.

### 1.3 关键光学元件

通过以上分析看到全光纤陀螺的光学部分是一个 Sagnac 干涉仪, 光路框图如图 3 所示, 主要由 SLD 光源、光电探测器、耦合器、起偏器、PZT 相位调制器、光纤线圈构成.

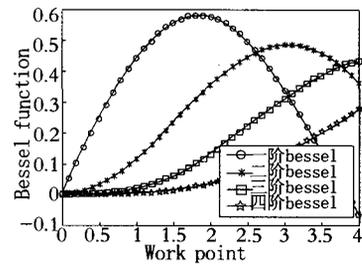


图 2 Bessel 函数随工作点的变化



图 3 光学部件原理框图

光学部分的主要功能是将 Sagnac 效应产生的光程差所引起的相位变化, 通过回路耦合器转换为光功率的变化, 再通过探测器探测后以电信号的形式输出至调制解调电路中. 下面对主要光学部件的设计及关键技术进行分析和探讨.

## 2 主要光学部件设计及关键技术

### 2.1 SLD 光源

具有相同端面反射率  $R$  的半导体光放大器的增益为

$$G = \frac{(1-R)^2 G_s}{1 + R^2 G_s^2 - 2R G_s \cos 2\beta l} \quad (4)$$

式中,  $G_s$  为单程增益;  $\beta$  为传播常数;  $l$  为器件腔长. 理想的 SLD 光源的  $R = 0$ , 此时净增益为单程增益  $G_s$ , 管芯的输出功率为:  $P = G_s P_s$  (5)

式中,  $P_s$  是在泵浦电流下自发辐射的导行分量. 在增益饱和之前,  $G_s$  可以表示为

$$G_s = \exp[\Gamma(g_0 \eta_i \frac{J}{d} - \alpha) l] = \exp[\frac{\Gamma k I}{d} - \Gamma \alpha l] \quad (6)$$

式中,  $g_0$  是以  $\text{cm}^2/\text{A}$  为单位的增益系数;  $J$  是以  $\text{A}/\text{cm}^2$  为单位的注入电流密度;  $d$  是以  $\text{cm}$  为单位的有源层厚度;  $\Gamma$  是光限制因子;  $l$  是以  $\text{cm}$  为单位的有源区长度;  $\eta_i$  是内量子效率;  $\alpha$  是以  $\text{cm}^{-1}$  为单位的衰减常数;  $k = g_0 \eta_i / s$ ,  $s$  是以  $\text{cm}$  为单位的有源区条

宽;  $I$  是以 A 为单位的电流。

由定性分析可得出:采用具有大的限制因子和低衰减常数结构,选取合适的腔长和有源层厚度和宽度,就可获得较大的增益,从而获得所需的输出功率。

## 2.2 探测器

探测器组件主要由 PIN 光电二极管和以低噪声 GaAs-FET 为输入级的跨阻抗放大电路组成。光信号通过光纤耦合和 PIN 光电二极管接收,经低噪声跨阻抗放大电路放大输出。光电二极管将光信号转化为光电流,跨阻抗放大电路将光电流转化为电压,信号放大后送给后续电路进行处理。组件电路原理框图如图 4 所示。

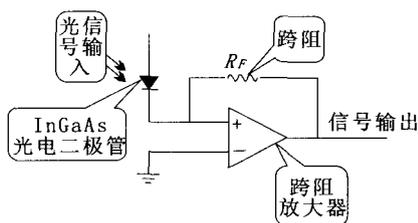


图 4 PIN 组件原理框图

PIN 光电探测组件所用三极管需选用高频低噪声小功率三极管,电路中反馈电阻的选用也很重要,电阻的热噪声和电流噪声对整个组件的稳定性参数有很大影响,电阻的关键参数电阻噪声电流指标应满足  $-38 \sim -30$  dB,温度漂移小于  $\pm 50$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.3 保偏光纤耦合器

由于保偏光纤为了保持偏振态,光纤内有 2 个掺杂的应力区,保偏性能越好则应力区的折射率比周围包层的折射率差异越大,这是保偏耦合器温度性能差的主要原因。目前保偏耦合器所用的光纤多采用的是匹配型的保偏光纤,即应力区的折射率与周围折射率的变化梯度为渐变形。除所用光纤外,拉锥工艺、封装工艺和用胶也是主要的关键技术。由于陀螺用光源是宽谱光源,而耦合器的耦合比对工作波长非常敏感,因此还要解决器件的光学带宽问题(与锥形结构有关)。

熔融拉锥法制作保偏光纤耦合器是将 2 根光纤中部的长约 20 mm 部分的涂覆层剥去,清洗干净,显微镜对轴,然后采用紫外胶固定,再置于专用微火炬上进行熔融拉锥,使 2 根光纤侧面融合在一起,形成

一双锥体,实现光的横向耦合,最后封装形成耦合器。

## 2.4 光纤起偏器

起偏器根据制作方式的不同有波导起偏器(如 Y 波导光学器件)、光纤起偏器和单偏振光纤。磨抛型保偏光纤耦合器是将适当长度的保偏光纤(PMF)进行光纤定轴后,粘贴在有弧形槽的基片上,对其进行研磨。研磨到一定程度后,在研磨面上镀  $\text{MgF}_2$  缓冲层,外镀 Al 金属膜,形成介质-金属波导,如图 5 所示。当光纤中的光传输到此区域时, TM 波激发出表面波,能量大量耦合并泄漏出去,而 TE 波不发生这种耦合,从而在光纤输出端得到单一的偏振光<sup>[4]</sup>。

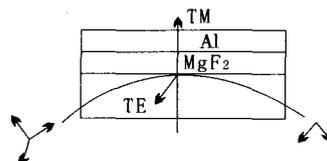


图 5 磨抛型保偏光纤起偏器结构框图

关于起偏器的结构设计,早期的设计是采用单偏振结构,在此基础上,后来改进为双偏振结构 PMF 偏振器,这种改进型偏振器,相对传统结构,牺牲了极小部分的传输损耗,但容易得到高消光比。关于介质金属膜的研究,早期采用的是在光纤上直接蒸镀一层金属膜,由于金属膜和光纤的折射率匹配的原因,这种设计对金属膜的厚度控制和镶入光纤的基片磨抛要求很高,工艺上难以实现<sup>[5]</sup>。而改进后的介质金属膜是带有  $\text{MgF}_2$  缓冲层的光学膜结构,有效地解决了保偏光纤和金属膜层的折射率匹配问题,大大降低了光学膜的制备难度。

## 2.5 PZT 相位调制器

PZT 相位调制器是全光纤陀螺中唯一能产生非互易性位移的元件,它的性能直接决定陀螺的性能。压电陶瓷相位调制器是利用  $\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3$  固溶体(也称 PZT 压电陶瓷)管的径向压电效应,把光纤绕在 PZT 管上,由改变通过 PZT 管的电压强度来调节光纤的长度,从而改变光纤中传输光的相位,最终达到相位调制的目的。

由于其固有的磁滞效应在相位调制中造成非线性电光效应,全光纤陀螺信号处理对寄生的二次谐波的基本要求是其幅度比基频调制幅度小 120 dB,



图 6 PZT 相位调制器

要满足这一点非常困难. 首先要从 PZT 的材料组分进行研制, 以使 PZT 的磁滞效应尽可能地小. 其次是 PZT 相位调制器所用的光纤, 需要抗拉力、有较大的调制系数.

## 2.6 光纤绕环

光纤环绕制过程中, 技术难点为张力控制和排纤, 这也是绕环质量的关键.

四极绕纤法是从一根光纤的中点开始绕起, 分别向光纤的 2 个端点对称地缠绕. 光纤具有弹性同时又很脆, 极易折断. 光纤具有弹性意味着在绕纤过程中需要一定的张力作用, 在零张力的情况下绕纤非常困难; 在绕纤过程中, 如果一个线轴上的光纤受伤, 则整个绕纤失败. 光纤的易碎性要求在绕纤过程中, 不能仅仅控制光纤的张力, 同时还要控制光纤与机械部位的接触面保证光纤的不屈曲. 目前, 就绕环时究竟施加多大张力为最佳, 以及各种方法的具体控制算法, 还没有一个较为理想的结论. 但从试验中有个定性的结论, 即张力过大, 环的最终测试结果肯定不理想. 因为影响光纤环的因素较多, 譬如温度、振动等, 绕环的质量非常重要, 底层排纤出现一条缝隙可能造成上层光纤的排列混乱, 最终导致对光纤屈曲的失控. 理想的四极对称陀螺线圈光纤全部是理想的圆, 排纤是理想的密排. 但实际上这种情况是无法实现的. 因为光纤的线径并不是理想的圆, 一根光纤的直径也不是一成不变的, 总是存在一个误差范围, 大约为  $\pm 5 \mu\text{m}$ .

在绕纤时, 每层绕纤的开始和结束都是关键, 即在骨架的 2 端是绕纤的难点. 由于机械加工精度及其他因素, 每层绕纤开始时与骨架的内壁的对齐较困难; 在每层的结束时, 由于绕纤时光纤之间存有不确定性的微缝隙, 骨架的宽度不能满足一层的排纤做到光纤的整数倍, 即在排纤结束一端剩余宽度可能

小于光纤直径, 这样就造成 2 端的光纤高于其他部位的光纤, 这为下层的排纤造成了困难.

## 3 搭建光路时部分难点的解决办法

全光纤陀螺光路搭建的难点是光纤轴向的对准. 整个光路除了探测器的输出尾纤为单模光纤外, 其余的都为保偏光纤, 光纤的轴向对准情况对器件性能有较大的影响, 尤其是轴向直接影响保偏耦合器的耦合比以及起偏器的消光比<sup>[6]</sup>. 因此在连接整个光路时, 采用实时监控的方法进行焊接. 另一个技术难点是全光纤陀螺光路的装配, 通过反复装配并对陀螺外壳经过了多次修改使之更便于组装, 最终完成了这项工作, 目前的管壳性能得到较大优化, 基本满足全光纤陀螺的光路性能要求.

光纤的固定, 对用胶的选择主要是通过对比实验来解决. 通过使用 520 瞬干胶, DG-4 环氧胶, 硅橡胶, 紫外固化胶分别固化后, 对测试所得结果分析, 520 瞬干胶对 PZT 管具有腐蚀性, 影响其性能, DG-4 环氧胶使用后器件调制性能不稳定, 硅橡胶太软造成器件无电光效应. 综上结果认为使用紫外固化胶效果最好.

对于光纤环的绕制, 主要是绕环过程中张力的控制, 就光纤本身而言, 特别是保偏光纤, 在拉制过程中就已经将应力加了进去, 因此, 再对光纤进行附加操作时, 须力求不再对其增加额外应力或破坏已有应力状态, 这样就需要小张力控制下绕环. 另外, 光纤环是很敏感的光学器件, 绕制过程操作状态或在后期的操作过程中存有不当动作, 都可能对最终的结果有影响.

绕环机张力控制采用的是通过传感器控制供纤轴转速达到控制张力的目的, 经过实际绕环所测得的数据来看, 这种张力控制装置虽然还存在一定的问题, 但基本可以满足生产的需要. 其原理为传感器实时感测作用于光纤上的外力, 并将信号实时传输给供纤轴, 根据作用于光纤上的外力实时调整供纤轴的供纤速率.

AQ8603 型 BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer: 布里渊散射光时域反射仪) 是日本公司生产的光纤应力分析仪. 它结合了布里渊散射技术和时域反射技术, 实现了光纤的应力分析, 可利用这种仪器对绕制的环进行测试.

(下转第 38 页)

射率传感时,明显优于传统的折射率计,但是存在温度交叉干扰的问题,需要温度和折射率的同时测量.目前的解决方案主要是利用不同谐振峰对温度和环境折射率的响应各自不同来实现这2个参量的分离,多个谐振峰可以用一个长周期光栅实现,也可以多个.而提高传感灵敏度的方法大都采用了包层腐蚀的方案,但是光纤的机械性能大打折扣.高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲边缘写入的长周期光栅强度高,而且同时兼顾了温度交叉干扰和传感灵敏度的问题,不失为一种较好的方案.当环境折射率高于光纤包层折射率时,长周期光栅已不再适于折射率传感,通过包层外涂敷的方法可以将其传感范围拓宽.这些基于长周期光纤光栅折射率传感器的实验研究将进一步推进长周期光纤光栅传感的实用化.

#### 参考文献

- [1] 王彦,梁大开,欧启标,等.测量液体折射率与浓度的光纤光栅传感器[J].传感器与微系统,2007,26(7):24-26,30.
- [2] 李志全,王莉,黄丽娟,等.基于长周期光纤光栅的折射率与浓度传感方案研究[J].应用光学,2004,25(4):48-50,55.
- [3] 徐艳平,顾铮先,陈家璧.长周期光纤光栅化学传感器研究进展[J].传感器技术,2005,24(12):5-6,9.
- [4] Turan Erdogan. Fiber Grating Spectra[J]. J. Lightwave Technol,1997,15(8):1277-1294.

- [5] 孔梅,石邦任.长周期光纤光栅对外界折射率的敏感性[J].光电器件,2003,24(6):386-388,446.
- [6] Gwandu B A L, Shu X, Allsop T D P, et al. Simultaneous refractive index and temperature measurement using cascaded long-period grating in double-cladding fibre[J]. Electron. Lett.,2002,38(4):695-696.
- [7] Kin Seng Chiang, Yunqi Liu, Mei Nar Ng, et al. Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index [J]. Electron. Lett., 2000, 36(11):966-967.
- [8] Jinhua Yan, A Ping Zhang, Li-Yang Shao, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by using dual long-period gratings with an etching process [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(9):1360-1361.
- [9] Mei Nar Ng, Zhihao Chen, Kin Seng Chiang. Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect[J]. Photon. Technol. Lett.,2002,14(3):361-362.
- [10] Tao Zhu, Yunjiang Rao, Jiuling Wang, et al. A highly sensitive fiber-optic refractive index sensor based on ar edge-written long-period fiber grating [J]. Photon. Technol. Lett.,2007,19(24):1946-1948.
- [11] 饶云江,莫秋菊,朱涛.一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J].光学学报,2006,26(2):264-268.
- [12] Ishaqa I M, Quintelac A, Jamesa S W, et al. Modification of the refractive index response of long period gratings using thin film overlays[J]. Sensors and Actuators B,2005,107(2):738-741.

(上接第34页)

光纤在成环前和成环后的特性变化是非常重要的,它直接反映了绕环过程是否导致光纤性能下降.光纤成环后的应力分布明显存在关于光纤中心对称的应力奇点.这些应力奇点与绕制过程中的2组换向点相对应.但是并不是所有的换向点处都有奇点产生,产生奇点处的换向点处的应力大小也不相同,分析这些奇点产生的原因,主要是在换向点光纤有微弯产生,如果对微弯处理不好,则会产生奇点.另外在绕环过程中由于人的干扰因素较大,出现较大的奇点也不排除人的因素.

## 4 结 论

光纤陀螺是光与电相结合检测微弱信号的一个比较复杂的系统工程.对各光学元件的研制,首先要进行充分的理论研究,如PZT材料配方的研制、与

MgF<sub>2</sub>镀膜工艺有关的各层波导有关的理论模型与分析,保偏耦合器有关的机理分析等,而元件加工和装配工艺也是系统实现的重要环节.

#### 参考文献

- [1] 张桂才,王巍.光纤陀螺仪[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [2] 周星炜,王占斌.基于光纤 Sagnac 干涉仪的旋转角度测量系统[J].传感器技术,2005,24(9):53-55.
- [3] 牟旭东.开环光纤陀螺数字解调的实现与探讨[J].压电与声光,2000,22(6):360-362.
- [4] 倪明,胡永明,陈哲,等.金属覆层保偏光纤偏振器的五层波导模型及理论分析[J].光学学报,2001,21(2):142-146.
- [5] 帅词俊,段吉安,苗健宇,等.熔锥型光纤耦合器的工艺与显微形貌研究[J].半导体光电,2005,2(26):108-112.
- [6] 石文江,李志高,郑平,等.保偏光纤偏振主轴方位图像特征分析[J].光电工程,1995,22(3):47-52.