

## 一种新型的再入式集成光学光纤陀螺研究

耿 凡, 孙丰玉

(天津津航技术物理研究所, 天津 300192)

**摘要:** 给出了一种改进型的再入式集成光学光纤陀螺方案, 在保持再入式集成光学光纤陀螺低成本、高温度稳定性、小型化特点的条件下, 通过偏振转换集成光学多功能器件(TMIOC)的使用, 有望消除光纤环多次再入的本征损耗, 减小总光损耗, 提高信噪比, 并可实现无光放大器(SOA)的高灵敏度光纤陀螺系统。TMIOC 器件的位相调制器部分(PM)采用退火质子交换波导(APE), 实现天然的高偏振特性; PS 是采用双模耦合方式实现的偏振模分离器, 分离比达到 20 dB; PT 是声光模转换器, 实现 TE 和 TM 偏振模的相互转换, 转换效率达到 99% 以上, 声波功率小于 20 mW。目前的器件指标适合较长的光纤长度和较少的再入次数, 满足高灵敏度光纤陀螺系统的要求; 通过提高器件指标, 如进一步提高响应速度, 降低插入损耗, 可实现较短的光纤长度和较多的再入次数的小型化、高灵敏度、低成本的第二代光纤陀螺系统的制作。

**关键词:** 集成光学; 光纤陀螺; 再入; 偏振模分离器; 声光模转换

**中图分类号:** V241.5; TN25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0010-04

## Research on a new type of re-entry IFOG

GENG Fan, SUN Feng-yu

(Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China)

**Abstract:** A new type of re-entry integrate fiber optics gyroscope(IFOG) which can remain the features of low-cost, high-temperature-stability and miniaturization is proposed. By use of the Transition-mode Multifunction Integrated-Optics Chip (TMIOC), it will eliminate the eigen loss caused by the multiple re-entry in fiber-ring. It will reduce the total loss of the light and raise the signal noise ratio. It can realize the high sensitivity FOG system without the semiconductor optical amplifier(SOA). The phase modulator (PM) of the TMIOC is made up of the anneal proton exchange waveguide (APE) which has natural high-polarization feature. The Polarization-mode Splitter (PS) of the TMIOC uses the method of dual-module couple and attains the separation of the two polarization modes. The separation ratio can reach 20 dB. The polarized-mode transition (PT) of the TMIOC makes the conversion of the polarization mode TE and TM with the acoustic-optics mode conversion. The efficiency of the conversion can reach over 99%, and the power of

收稿日期: 2002-08-20; 修订日期: 2003-10-20

作者简介: 耿凡(1962-), 男, 天津人, 研究员, 主要从事光电子器件、集成光学器件的研究工作, 发表论文 10 余篇。

the acoustic is less than 20 mW. The items of the device are apt to the longer fiber and the less re-entry times at present. It can meet the demands of the high sensitivity FOG system. The improvement of the device, for example, improvement of the response speed and reduction of the couple loss, will make the device be used in the descendant-FOG with shorter fiber, more re-entry times, miniaturization, high sensitivity and low-cost.

**Keywords:** Integrate optics; Fiber optics gyroscope; Re-entry; Polarization splitter; Acoustic-optics mode conversion

## 0 引言

随着光纤陀螺技术的不断成熟,及应用范围的不断扩大,对陀螺性能稳定可靠的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。在追求低成本、小型化、特别是低温度敏感性方面进行了多方面的探索<sup>[2,3]</sup>,其中干涉型光纤陀螺(IFOG)是目前技术最成熟的一种(称为第一代光纤陀螺),在中等精度范围内( $1\sim 0.01^\circ/\text{h}$ ),性能价格比最优,而在高精度范围( $0.01^\circ/\text{h}$ 以上时),则面临一些问题,如温度漂移、光纤过长造成成本过高等,因此要通过各种新型的陀螺方案来解决,如谐振式光纤陀螺(R-FOG)、Brillouin 光纤陀螺(B-FOG)<sup>[4,5]</sup>、再入式光纤陀螺(Re-entrant FOG)<sup>[6]</sup>等(称为第二代光纤陀螺)。其中再入式光纤陀螺吸收了谐振式光纤陀螺和 Brillouin 光纤陀螺的优点,有效地解决了 IFOG 存在的一些问题,(1)使用较短的保偏光纤(约几米至几十米),实现几百米到几千米光纤达到的测量精度,使光纤陀螺成本大大降低;(2)有效地提高了光纤敏感环的温度稳定性,减小了零点漂移;(3)为光纤陀螺小型化创造了条件。文中描述了一种新型的再入式集成光学光纤陀螺方案,并对其中的关键元件偏振转换集成光学多功能器件给予了介绍。

## 1 再入式集成光学光纤陀螺原理

再入式集成光学光纤陀螺的光学原理如图 1 所示。图中的光纤陀螺系统与普通的干涉式光纤陀螺的主要区别是,通过保偏耦合器  $C_2$  与闭环的光纤环连接,代替常规的开放式光纤环,当光在闭环的光纤环中传播若干圈(如  $M$  圈)后,其传播距离等效于长

的开放式光纤环长度,环中相对传播的两束光 CW、CCW 光位相差  $\Delta\varphi$  与角速度  $\omega$  之间的关系为:  $\Delta\varphi = 2\pi(LD/\lambda c)\omega$ , 式中  $\lambda$  为光源的中心波长;  $c$  为真空中的光速;  $D, L$  为 Sagnac 敏感环的直径和长度。根据上式可知陀螺灵敏度与传播距离  $L$  成正比,因此当  $M$  足够大时可达较高的灵敏度,而光纤长度只有几米或几十米,同时较短的光纤环可降低长期温漂效应,从而解决了高精度光纤陀螺的难题,同时降低了陀螺成本(保偏光纤成本较高)。

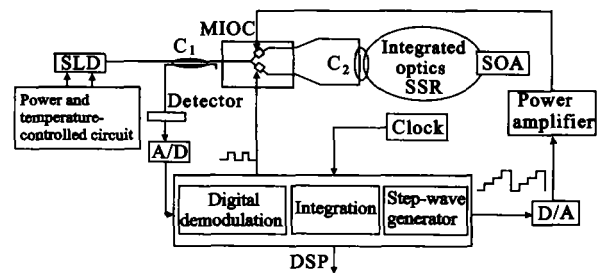


图 1 再入式集成光学光纤陀螺

Fig. 1 Experimental setup of re-entry IFOG

系统一般采用由宽光谱光源 SLD、探测器及一个耦合器组成的光源模块。由于采用短相干长度的光源,谱宽要求大于 25 nm,根据光相干长度的定义公式:  $L = \lambda^2 / \Delta\lambda$ , 可得光波的相干长度小于  $67.6 \mu\text{m}$ , 其数值远小于光纤环 SSR 的长度(典型值大于 1 m)。在此系统中,只有传播了同样圈数的 CW 和 CCW 光才能相干,所以再入式集成光学光纤陀螺的输出是那些在光纤环 SSR 中分别沿 CW 和 CCW 两个方向传播相同圈数的光波信号的干涉总和。

依据信噪比等于 1 的条件,可得到集成光学光纤陀螺的角速度分辨率的关系式,并可推出陀螺的理论角速度分辨率随着再入次数的增大而提高<sup>[2]</sup>。再入

式集成光学光纤陀螺与普通干涉式陀螺相比,其光可在光纤环 SSR 中行走多圈,因而光纤环 SSR 的长度变长  $n$  倍, $n$  是光在光纤环 SSR 中行走的圈数,其优势也在于此。

再入式集成光学光纤陀螺所固有的缺点是:(1)增加了光损耗,(2)第  $n$  阶再入信号最弱,相反作为噪声信号的  $1 \sim n-1$  阶再入信号却较强,因此提取在光纤环 SSR 中行走了  $n$  圈的、具有较高信噪比的再入信号具有一定难度。

## 2 再入式集成光学光纤陀螺方案的改进

在上述的再入式集成光学光纤陀螺中,通过  $C_2$  耦合入光纤环 SSR 中的光,在环中传播一圈后都会有一部分光耦合出来,对信号光形成本征损耗,因此  $C_2$  一般选择较小的功率耦合比,但同时又减小了  $C_2$  耦合入光纤环 SSR 中的光强度,同样降低最终的信号强度。对于相应的再入次数  $M$  有一个最佳的功率耦合比,光纤环第  $n$  阶输出与输入光功率的关系可表示为:

$$P_o(n) = P_i k^2 (1 - \gamma)^n (1 - k)^n \quad (1)$$

$$\frac{P_o(n)}{P_i} = k^2 (1 - \gamma)^n (1 - k)^n \quad (2)$$

式中  $P_o(n)$  和  $P_i$  为第  $n$  阶输出与输入光功率; $\gamma$  和  $k$  为耦合器  $C_2$  的功率插入损耗因子和功率耦合比。在此光纤的传输损耗由于远远小于耦合损耗和  $C_2$  附加损耗而被忽略,其中  $C_2$  的功率插入损耗因子对应的损耗值约为 0.2 dB,当  $n$  为某一值时,取公式(2)对  $k$  的导数为零,求最大值:

$$d\left(\frac{P_o(n)}{P_i}\right) / dk = (1 - \gamma)^n [2k(1 - k)^n - nk^2(1 - k)^{n-1}] = 0$$

得:

$$k = \frac{2}{2 + n}$$

当  $n=98$  时, $k$  的最佳值为 2%,即  $C_2$  耦合比为 2:100,根据公式(2)损耗值约为 60 dB。当  $n=10$  时, $k$  的最佳值为 1/6,即  $C_2$  耦合比为 1:6,根据公式(2)损耗值约为 24 dB。返回到探测器的  $1 \sim n-1$  阶再

入信号光,成为较强的噪声信号需被滤除。

为解决以上问题,设计了一种改进型再入式集成光学光纤陀螺方案,如图 2 所示。

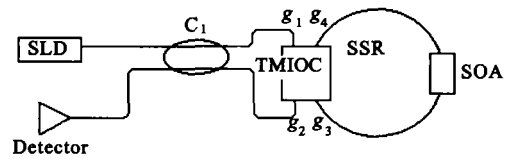


图 2 再入式集成光学光纤陀螺原理

Fig. 2 Principle of re-entry IFOG

与图 1 相比将  $C_2$  去掉改由偏振转换集成光学多功能器件连接敏感光纤环 SSR, $C_1$  采用高质量的保偏光纤耦合器,SLD 光输入  $C_1$  的一个光轴分为 CW 和 CCW 光,以 TE 偏振方向进入 TMIOIC。当  $g_1$  端和  $g_2$  端(如图 3 所示)依次经过偏振器、位相调制器再相向进入偏振模分离器 PS 时,由于 PS 的偏振模分离特性, $g_1$  和  $g_2$  输入光分别进入  $g_3$  臂和  $g_4$  臂,再经偏振模转换器 PT 变为 TM 偏振光从输出进入 SSR,当光返回到 TMIOIC 时,进入  $g_4$  端和  $g_3$  端的 TM 偏振光错过 PT 的转换脉冲,不发生偏振变化,经过 PS 后分别从  $g_3$  端和  $g_4$  端输出,从而实现完全的多次再入,而不从  $g_1$  端和  $g_2$  端输出。当光旋转  $M$  圈后,在 PT 处遇到转换脉冲变为 TE 偏振光,从  $g_2$  端和  $g_1$  端输出返回  $C_1$ ,完成信号输出。

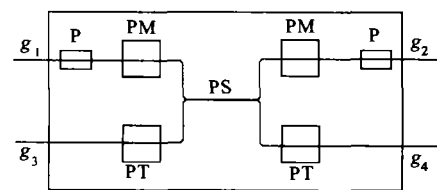


图 3 TMIOIC 结构图

Fig. 3 Structure of TMIOIC

该方案的优点是在 TMIOIC 处消除了原来  $C_2$  的本征耦合损耗,即消除了  $1 \sim n-1$  阶的耦合输出信号,而这些信号输出的是有害的噪声信号,因而大大减小了本底噪声,提高了信噪比,进而降低了该系统对 SOA 的要求;目前的缺点是 TMIOIC 的损耗较大,端对端的损耗约为 3~4 dB,比较现实的目标可达到 1~2 dB,当使用的光纤较长时,即  $M$  数不太大时,可实现无 SOA 的再入式光纤陀螺系统。

### 3 偏振转换集成光学多功能器件原理及制作

偏振转换集成光学多功能器件的原理如图4所示,其中 $g_1$ 和 $g_2$ 端的位相调制器部分采用退火质子交换波导(APE),实现天然的高偏振特性,PM<sub>1</sub>、PM<sub>2</sub>为两个电光调制器;其他波导部分为钛扩散波导,以支持两个偏振模;PS采用双模耦合方式实现偏振模分离,使TE模直通, TM模直通;PT采用声光模转换器,实现TE和TM偏振模的相互转换,目前制作的PS偏振模分离比达到20 dB;PT模转换效率达到99%以上,声波功率小于20 mW。

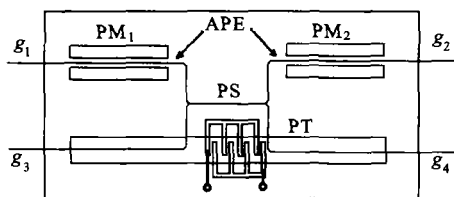


图4 TMIOC原理

Fig. 4 Principle of TMIOC

使用器件时用与位相调制相同的时钟脉冲来调制PT的驱动射频信号,通过延时位相和脉冲周期的调整,实现位相调制信号的输入和第 $M$ 阶再入信号的同步输出,由于目前使用的声光模转换器PT的响应速度为 $\mu\text{s}$ 量级,因此为减小低阶再入信号偏振模的再转换输出率,所使用的光纤长度一般以200 m为宜,相应 $M$ 数约为10,与前述无SOA陀螺系统的要求一致,适合于高精度光纤陀螺系统(光纤传播距离2000 m)的制作。

当改善PT的响应速度后,可减小光纤的长度,同时改善信号处理的质量,这可通过电光效应型器件的使用,或组合串联型声光模转换器的使用达到目的。

### 4 结 论

根据以上讨论,给出了一种改进型的再入式集成光学光纤陀螺方案,通过偏振转换集成光学多功能器件的使用,有望消除光纤环多次再入的本征损耗,减小总光损耗,提高信噪比,并可实现无光放大器的高灵敏度光纤陀螺系统。TMIOC器件的主要元件已制作完成,性能指标达到了国际先进水平,目前的器件指标适合较长的光纤长度和较少的再入次数,满足高灵敏度光纤陀螺系统的要求;通过提高器件指标,如进一步提高响应速度,降低插入损耗,可实现较短的光纤长度和较多的再入次数的小型化、高灵敏度、低成本的第二代光纤陀螺系统的制作。

#### 参考文献:

- [1] Hotate K. Future evolution of fiber optic gyros[A]. SPIE[C], 1996, 2837, 33.
- [2] Lefevre H C, Vntoux S, Papuchon M, et al. Integrated optics: a practical solution for the fiber optic gyroscope[A]. SPIE[C], 1986, 719, 101-112.
- [3] 张桂才, 杨清生. 采用双Y型LiNbO<sub>3</sub>集成光路的闭环光纤陀螺研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1), 57-61.
- [4] Kung A, Thevenaz L, Robert P A. Polarization analysis of Brillouin scattering in a circularly birefringent fiber ring resonator [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(6), 977-982.
- [5] Feced R, Parker T R, Farhadiroushan M, et al. Power measurement of noise-initiated Brillouin applications[J]. Opt Lett, 1998, 23(1), 79-81.
- [6] 高峰, 赵林, 田伟, 等. 再入式集成光学陀螺原理研究[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(3), 198-201.

(上接第4页)

- [8] 刘正云. 红外烟幕遮蔽效果的评价[J]. 光电对抗与无源干扰, 1996, (2), 9-12.
- [9] 李瑾. 国外红外干扰技术现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 1995, (4), 25-29.
- [10] 徐代升, 李钟敏, 杨英科. 用红外成像技术外场研究红外烟幕的遮蔽性能[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(1), 69-72.

- [11] 熊晓伟. 光电干扰评价的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1996.
- [12] 桑建国, 温市耕. 大气扩散的数值计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [13] 钟志农, 黎全. 烟幕扩散的计算机模拟[J]. 光电对抗与无源干扰, 1999, (3), 18-23.