

文章编号 : 0258-7025(2001)10-0918-03

# 新型组合晶体光纤陀螺的构想

徐宏杰

(北京理工大学光电工程系 北京 100081)

章民驹

(南海市发展股份有限公司 南海 528200)

**提要** 提出了一种新型结构的光纤陀螺,它将起偏器和两只定向耦合器集成在一块由两只光轴方向相互成  $45^\circ$  胶合而成的冰洲石晶体上。同传统集成型光纤陀螺(IFOG)相比,它具有结构简单、性能稳定、损耗小、体积小、成本低的特点。详细分析了它的工作原理,并给出了其信号检测方案。

**关键词** 光纤陀螺,集成光学,光纤器件,光学晶体

中图分类号 V 241.5+58 文献标识码 A

## Novel Crystal Integrated Fiber Optical Gyroscope

XU Hong-jie<sup>1</sup> ZHANG Min-ju<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)  
(<sup>2</sup>Nanhai development Co. Ltd., Nanhai 528200)

**Abstract** In this paper, a novel structure fiber optical gyro is proposed. It consists of a pair of calcite crystals oriented by  $45^\circ$  and adhered together, in which a polarizer and two directional couplers are integrated. Comparing with traditional IFOG, it has the advantages of simple structure, stability, small volume and low cost. The operation principle and method for signal detection are theoretically analyzed.

**Key words** fiber optical gyroscope, integrated optics, fiber optic component, optical crystal

## 1 引言

光纤陀螺在惯性导航中具有重要的地位,目前的精度已达到了惯导量级,并有可能在不远的将来取代传统的机械陀螺<sup>[1]</sup>。光纤陀螺比较成熟的方案是闭环干涉型,其关键器件是一只集成在铌酸锂晶体上的三功能芯片,包括偏振器、耦合器和调制器<sup>[2]</sup>。这一结构的缺点之一是插入损耗较大,一般在  $3 \sim 6$  dB,考虑到往返光路,实际插入损耗为  $6 \sim 12$  dB。此外三功能芯片与光纤的耦合受温度的影响较大,制作工艺也较复杂。

目前国内集成光学三功能芯片插入损耗较大,重复性和稳定性也较差,这已成为制约国内光纤陀螺发展的一个障碍。为此本文提出一种新型结构的光纤陀螺,称为晶体集成型光纤陀螺,它将起偏器和两只定向耦合器集成在一块冰洲石晶体上。

## 2 陀螺结构

该陀螺光路结构见图 1。光源(SLD)发出的光经梯度透镜 1 准直后变成平行光进入冰洲石晶体 5。在晶体 5 中,偏振方向与晶体光轴垂直的光( $o$ 光)沿原方向传播,另一束光( $e$ 光)偏离一个角度损耗掉。晶体 6 与晶体 5 光轴成  $45^\circ$  夹角。这样进入晶体 6 的线偏振光被分为两束强度相等、偏振方向相互垂直的线偏振光,经梯度透镜 3 耦合后进入光纤环。在与保偏光

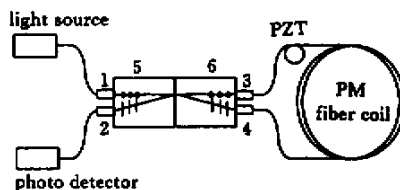


图 1 晶体集成型光纤陀螺

1~4 梯度透镜 5,6 冰洲石晶体

Fig.1 Crystal integrated fiber optical gyroscope

1~4: gradient index lens; 5,6: calcite crystal

纤环耦合时,注意使两束线偏振光同时与光纤环的快轴或慢轴平行。光纤环输出光再经梯度透镜 3 4 准直后进入晶体 6 并会合发生干涉,干涉后的光进入晶体 5。

当光纤环静止时,进入晶体 5 的光与原来的光偏振方向相同,因此返回到光源,探测器探测到的光强为零。当光纤环发生转动时,因为非互易相位差,干涉后的光偏振方向与原来不同,这样进入晶体 5 的光将有一部分分量偏离原方向,进入探测器。所以探测器探测到的信号是非互易信号。

从以上分析可以看出,这一结构同开环全保偏光纤陀螺有些类似<sup>[3]</sup>(见图 2),但结构更为简单。

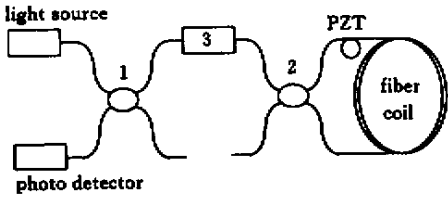


图 2 干涉型光纤陀螺

1 2 :定向耦合器 3 :偏振器

Fig.2 Interference fiber optic gyroscope

1 2 :directional coupler ; 3 :polarizer

但两者也有明显的区别。首先,图 1 同图 2 相比,少了一只定向耦合器,减少了 6 dB 的插入损耗。在图 2 中,两束干涉光的振动方向相同,而在图 1 中,两束干涉光的振动方向相互垂直。在静止时,图 1 中进入探测器的光强为零,而图 2 中进入探测器的光强为最大值。此外图 1 比图 2 结构更紧凑,体积小得多,也减少了外界干扰。

### 3 集成晶体的工作原理及性能

该陀螺的核心器件是一块集成晶体,它由两块光轴方向成 45°角的冰洲石晶体胶合而成,同集成光学器件相比,它的插入损耗小,仅为 1 dB 左右;温度性能好,在 -40℃ ~ +70℃ 的温度范围内具有良好的稳定性。此外,冰洲石晶体具有非常高的消光比,可大大减少陀螺的偏振噪声。

图 3 为集成晶体的光路图,箭头为晶体的光轴方向,入射光在晶体中分为 o 光和 e 光,o 光沿原来的方向传播,e 光偏离一小角度,约 6°。设晶体厚度 15 mm,这样两束光分开的距离约 1.5 mm,进入第二块晶体的光为严格的线偏振光。第一块晶体与第二块晶体光轴

成 45°夹角胶合在一起,所以进入第二块晶体的光分为强度完全相等的两束光。从光纤环返回到晶体的光重新汇合到一点并发生干涉,这是两束振动方向相互垂直的偏振光的干涉,干涉后为椭圆偏振光,偏振态为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\pi/4 & \sin\pi/4 \\ -\sin\pi/4 & \cos\pi/4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_0 \\ E_0 e^{i\Delta} \end{bmatrix} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (1 + \cos\Delta_s) + i\sin\Delta_s \\ (-1 + \cos\Delta_s) + i\sin\Delta_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设进入光纤环的两束光光强均为  $I_0$ ,  $I_0 = E_0^2$ , 进入探测器的光强为

$$I = E_y * E_y^* = I_0(1 - \cos\Delta\Phi_s) \quad (2)$$

其中  $\Phi_s$  为 Sagnac 相移。由此可见,当陀螺静止时,  $I = 0$ ,这与普通干涉型光纤陀螺刚好相反。

此外,这种集成晶体还可以做成消偏型光纤陀螺,用两段长度比为 1:2 的保偏光纤与输出光偏振方向成 45°角耦合做成消偏器,光纤环为单模光纤<sup>[4]</sup>,其结构如图 4。

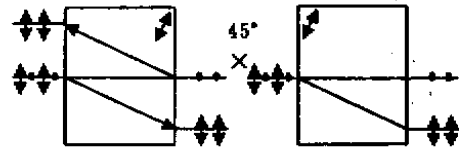


图 3 集成晶体光路示意图

Fig.3 Optical schematic of integrated crystals

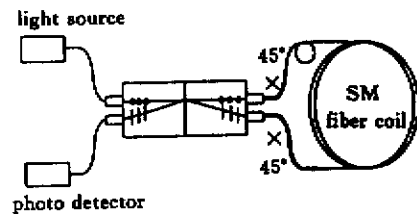


图 4 晶体集成型单模消偏光纤陀螺

Fig.4 Crystal integrated depolarized fiber optic gyroscope

在光纤环中传播的光为非偏振光,返回到晶体后,有一半的光强损耗掉,所以这一结构探测器检测到的信号是全保偏方案的一半。

### 4 信号检测方案

这里只分析压电陶瓷(PZT)相位调制方案。当 PZT 上加上正弦调制时,根据公式(2)

$$I = I_0 \{1 - \cos[\Phi_m \sin \omega t - \Phi_m \sin(\omega t + \Delta\Phi_s)]\} \sim 12 \text{ dB}.$$

$$= I_0 \{1 - \cos[\Phi_0 \cos(\omega t) + \Delta\Phi_s]\}$$

其中,  $\Phi_m$  为相位调制系数,  $\Phi_0 = 2\Phi_m \sin(\omega t)$ ,  $\omega$  为调制频率,  $\tau$  为光纤环的延迟时间。将(3)式按贝塞尔函数展开<sup>[5]</sup>得

$$I = I_0 [1 - J_0(\Phi_0) \cos \Delta\Phi_s] +$$

$$4I_0 J_1(\Phi_0) \sin \Delta\Phi_s \cos \omega t +$$

$$2I_0 J_2(\Phi_0) \cos \Delta\Phi_s \cos 2\omega t -$$

$$4I_0 J_3(\Phi_0) \sin \Delta\Phi_s \cos 3\omega t +$$

$$2I_0 (1)^{n-1} \sum_{n=2}^{\infty} [J_{2n}(\Phi_0) \cos \Delta\Phi_s \cos 2n\omega t +$$

$$J_{2n+1}(\Phi_0) \sin \Delta\Phi_s \cos(2n+1)\omega t] \quad (4)$$

通过相敏检波可以得到一次谐波的直流成分,即陀螺的输出信号

$$V_{\text{out}} = 2KI_0 J_1(\Phi_0) \sin \Delta\Phi_s \sin \Delta\Phi_s \quad (5)$$

式中,  $K$  为检测电路的总增益。当  $\Phi_0 = 1.84$  时,  $J_1(\Phi_0) = 0.58$  为最灵敏工作点。

## 5 结束语

晶体集成型光纤陀螺与集成 Y 波导光纤陀螺相

比,它的插入损耗要小 6~12 dB。考虑到这种陀螺少了一只定向耦合器,所以又少了 6 dB 的损耗,这样总的插入损耗小 12~18 dB,信号强度大大提高。该陀螺的另一优点是温度性能好。无论同集成 Y 波导相比还是同光纤耦合器相比,冰洲石晶体的温度性能都好得多。它可以保持高的消光比和严格 1:1 的分光比,可以克服偏振噪声和 Kerr 效应引起的非互易。这种陀螺具有潜在的高精度,很容易通过环境实验走向实用化,适合大批量生产,目前光纤与梯度透镜、梯度透镜与晶体耦合的工艺都很成熟,所以其潜在的成本很低。

## 参 考 文 献

- 1 E. Udd. Sensing and instrumentation applications of the sagnac fiber optic interferometer. *SPIE*, 1994, **2341**: 52~58
- 2 H. C. Lefevre, S. Vatoux, M. Papuchon *et al.*. Integrated optics: A practical solution for the fiber optic gyroscope. *SPIE*, 1986, **719**: 101~112
- 3 H. Lefevre. *The Fiber Optic Gyroscope*. Boston: Artech, 1993
- 4 B. Szafraniec, J. Feth, *et al.*. Performance improvement in depolarized fiber gyros. *SPIE*, 1995, **2510**: 37~48
- 5 S. Oho, *et al.*. An experimental study on optical fiber gyroscopes for automotive applications. *Trans. IEICE*, **J72-C-11**(8): 811~814