



# [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03103030.0

[43] 公开日 2004年8月18日

[11] 公开号 CN 1521479A

[22] 申请日 2003.1.28 [21] 申请号 03103030.0

[71] 申请人 电子科技大学

地址 610054 四川省成都市建设北路二段四号

[72] 发明人 刘永智 曾雪飞 代志勇 汤卫国  
彭增寿 吴金谦 张利勋

[74] 专利代理机构 隆天国际知识产权代理有限公司

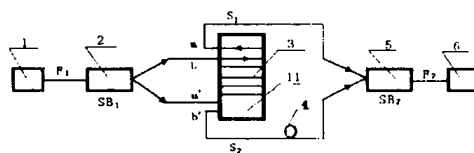
代理人 楼仙英 潘培坤

权利要求书1页 说明书9页 附图3页

[54] 发明名称 基于MZ干涉原理的干涉式光纤陀螺仪

[57] 摘要

本发明涉及一种基于MZ干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，该陀螺仪包括光源、分束器及光检测装置；其中还包括由MZ干涉的两光纤臂构成的光纤传感线圈，光纤线圈以同心、同向、同一直径绕制而成；其中光源的光经分束器后分别与光纤线圈上的两光纤臂的一始端、一末端相连，在光纤中形成了等效的正向反向传输光信号，由两光纤臂分别对应的另一末端、一始端合束输出干涉光信号至光检测装置；本发明采用区别于Sagnac干涉原理的MZ干涉原理，其正向传导光路与干涉光光路独立，相互之间不产生干扰，且不存在多次光分路所造成的功率损耗。



1、一种基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，包括光源、分束器及光检测装置；其中还包括由 MZ 干涉的两光纤臂构成的光纤传感线圈，光纤线圈以同心、同向、同一直径绕制而成；其中光源的光经分束器后分别与光纤线圈上的两光纤臂的一始端、一末端相连，在光纤中形成了等效的正向反向传输光信号，由两光纤臂分别对应的另一末端、一始端合束输出干涉光信号至光检测装置。

2、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于在光纤臂输出的一路干涉光路上设相位调制器。

3、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于光源至分束器之间和/或分束器与两光纤臂输入端之间设消偏器。

4、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于所述的干涉光信号可以还通过合束器进入光检测装置。

5、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于所述的光检测装置为干涉条纹电子细分检测装置。

6、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于所述的光源为单模激光光源。

7、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于所述的光纤为低损单模或保偏光纤。

8、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于所述的相位调制器为压电陶瓷光纤相位调制器、LiNbO<sub>3</sub> 集成电光调制器中的一种。

9、如权利要求 1 所述的基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，其特征在于两光纤臂的长度控制包括下述方法：首先通过调制相位法粗测调整光纤长度使光纤两臂长度差达到 1cm 的探测精度，然后通过“白光”干涉法进行精测，研磨光纤使得光纤两臂长度差达到微米量级探测精度，最后通过相位调制器进行光纤长度补偿几乎实现零臂差。

## 基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪

### 技术领域

本发明涉及一种光纤陀螺仪，尤其是一种基于 MZ 干涉原理的干涉式光纤陀螺仪。

### 背景技术

光纤陀螺是一种无机械转子的新型全固态惯性仪，在航天、航空、航海、车辆、军事及许多民用领域具有广阔的应用前景，受到国内外的广泛重视。光纤陀螺的发展已有 20 余年的历史，发表的相关文章与论著非常之多，专利不少，经过多年的研究，到目前为止已有好几种光纤陀螺实现产业化，并在军事与民用领域得到应用。从技术角度来看，目前的光纤陀螺主要有应用 Sagnac 干涉效应的干涉式光纤陀螺以及谐振式光纤陀螺两种，Sagnac 干涉式光纤陀螺包括全光纤式与集成光学-光纤型干涉式光纤陀螺。而另一类是正在研究之中的谐振式光纤陀螺以及新近发展的布里渊散射光纤陀螺。其中干涉式光纤陀螺仪的技术研究透彻、相对成熟，而谐振式光纤陀螺试图用较短光纤来完成对角速度的探测，但需要强相干光源，不能象干涉式光纤陀螺那样采用宽带弱相干光源简单地降低各种寄生效应。

其中 Sagnac 干涉效应的原理如图 5 所示，图 5 采用简单的圆形光路来解释其原理。首先，光束经过分束器从 M 位置进入干涉仪，分成正向反向传输的两束光，在系统静止状态下两束光沿着光路传输一圈再次回到分束器，由于分束器位置仍为 M 点，所以两束光的相位差为零。当系统发生旋转的时候，两束光沿着光路传输一圈之后回到分束器的时候，由于系统旋转分束器由原来的 M 位置移动到 M' 位置时，此时两束光产生相位差。而且相位差为：

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

其中  $l$  为光纤的长度、 $R$  为光纤环的直径、 $\Omega$  为旋转角速度， $c$  为光速， $\lambda$  为光波长。通过检测两束光的相干光强可以精确测出光纤环的转动角速度。

传统集成光学-光纤型干涉式光纤光学陀螺的结构如图 4 所示，光源通常

采用宽带超辐射发光二极管 SLD 光源，耦合器是一个 3dB 光功率耦合器（50%：50%）用于正向的光功率输入到光纤线圈中，同时也将光纤线圈中的光信号合束输出到光探测器上。Y 分支通常采用单偏振  $\text{LiNbO}_3$ -Y 分支，它用于 3dB 光分路（光功率 50%：50%）、光起偏检偏以及光信号的调制。这样 SLD 发出的光信号通过耦合器只有 1/2 光功率向前继续传输，另外 1/2 光功率就浪费了，继续传输的光信号在 Y 分支处起偏，同时将光信号分成两束形成光纤线圈中反向传输的光束，此外 Y 分支上的调制器把陀螺工作点偏置在最大灵敏度点（开环检测）或实时补偿 Sagnac 相移（闭环检测）。由于 Sagnac 效应两路光信号通过光纤线圈回到 Y 分支处合路时，两路光信号存在相位差产生干涉效应，干涉光再次通过 3dB 的耦合器送到探测器进行光信号相位信息检测，这样整个过程中只有 1/4 的光功率得到了利用。全光纤干涉式光纤陀螺和光纤—集成光学干涉式光纤光学陀螺类似，仅仅是采用分离的光纤分路器、光纤偏振器件、光纤相位调制器（PZT 压电陶瓷光纤相位调制器）代替集成光学  $\text{LiNbO}_3$ -Y 分支器件。所以传统的干涉式光纤陀螺仪都存在以下缺点：首先是光功率利用率低，仅为输出光功率的 1/4；其次存在正向反向传输光需要采用低相干光源（SLD）来降低后向反射与散射的相干噪声，而且 SLD 始终是陀螺方案中的一种折中，它存在着工艺复杂、输出功率小、输出光谱不稳定等缺点。

谐振式光纤陀螺利用循环光束在环形谐振腔中的多次振荡产生多波束干涉，可以在较短的光纤中获得较高的灵敏度，但是该种陀螺需要高相干光源同时谐振腔中的损耗对系统的输出特性影响很大。由于本发明采用的是干涉式原理对于谐振式陀螺的原理不同不再详细说明。

MZ 干涉仪全称为：Mach-Zehnder 干涉仪，其结构示意图如图 6 所示。光从光源 S 发出经过光耦合器（分路器）把光信号分成两路，分路比为 1：1，两路光分别送入 M-Z 干涉仪光纤的信号臂和参考臂，信号臂上的光受到外界信息如温度、振动等的影响而受到调制，参考臂不受到该种调制，两根光纤输出的光进行干涉。当光纤输出端口为自由端时输出出现干涉条纹如图 6（a），通常采用光纤耦合器将两个臂输出的光合束送到探测器探测如图 6（b）。

## 发明内容

本发明的目的是为了克服了传统干涉式光纤陀螺仪的光功率利用率低、干涉光与正向光在同一光路传输造成干扰、及信噪比低的缺点，而提供了一种基于MZ干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，该陀螺仪采用区别于Sagnac干涉原理的MZ干涉原理，其正向传导光路与干涉光光路独立，相互之间不产生干扰，且不存在多次光分路所造成的功率损耗。

本发明的目的可通过如下措施来实现：

一种基于MZ干涉原理的干涉式光纤陀螺仪，包括光源、分束器及光检测装置；其中还包括由MZ干涉的两光纤臂构成的光纤传感线圈，光纤线圈以同心、同向、同一直径绕制而成；其中光源的光经分束器后分别与光纤线圈上的两光纤臂的一始端、一末端相连，在光纤中形成了等效的正向反向传输光信号，由两光纤臂分别对应的另一末端、一始端合束输出干涉光信号至光检测装置。

根据上述装置，在光纤臂输出的一路干涉光路上还可设相位调制器。

根据上述装置，光源至分束器之间和/或分束器与两光纤臂输入端之间设消偏器。

所述的干涉光信号还通过合束器进入光检测装置。

所述的光检测装置为探测器。

所述的光检测装置为干涉条纹电子细分检测装置。

所述的光源为单模激光光源。

所述的光纤为低损单模或保偏光纤。

所述的相位调制器为压电陶瓷光纤相位调制器、LiNbO<sub>3</sub>集成电光调制器中的一种。

所述的光检测装置的信号与信号处理装置相连。

本发明相比现有技术中的干涉式、谐振式光纤陀螺技术的优点主要在于：

1、本发明采用了新的工作原理。本发明采用的是用两臂对称的环状光纤线圈（非谐振式）进行M-Z干涉的原理，它与前述两种陀螺原理完全不同；按照这一原理它可以获得与已有光纤陀螺相同甚至更高的灵敏度，而整个系统结构相对简单、工作可靠，其性价比更高。

2、本发明采用单模半导体激光器，而无须采用第一种方法所用的专门设计的宽带超辐射半导体光源或第二种方法中应用的窄光谱线宽的强相干光源，所选择的这类光源容易获得、且价格便宜、性能稳定、输出功率高。

3、本发明 M-Z 干涉用的两臂环状光纤具有平衡对称的结构因而可以采用非保偏光纤，这将提高系统的可靠性、减化制作工艺、大大降低成本。同时采用消偏振方案同样可以获得较高的精度。

4、本发明由于采用两路彼此互相独立的光路，因此不形成在第一种方法中的光在同一光路中来回传输所产生的非互易性影响问题，在中低精度的产品中甚至可以采用单模光纤加消偏振的技术方案，这使得系统设计的复杂性以及系统的总体成本都将大大降低。

5、本发明的光信号是以正向传输，不形成在传统的干涉型光纤陀螺中的反向传输光对光源的干扰以及因为多次光分路而造成的光损失，在相同输入光强的情况下，其输出光强是传统干涉式光纤陀螺的两倍，这对提高输出信噪比是大有好处的。

6、本发明输出光强比现有光纤陀螺高，且不成在互易性影响，从而有利于高灵敏度探测。

7、本发明的信号探测同样可采用开环或闭环方式，而且可以采用电子细分方式提高探测精度。

## 附图说明

- 图 1 是本发明的实施例一单轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图  
图 2 是本发明的实施例二单轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图  
图 3 是本发明的实施例三三轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图  
图 4 是传统的干涉式光纤陀螺仪结构示意图  
图 5 是公知的 Sagnac 干涉效应原理图  
图 6 是公知的 MZ 干涉效应原理图  
图 7 是本发明的实施例四的单轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图  
图 8 是本发明的实施例五的单轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图  
图 9 是本发明的实施中两光纤臂长“白光”检测方案的结构示意图  
图 10 是本发明的实施中两光纤臂差为 100um 的“白光”检测输出光功率示意图

图中标号说明如下：

1-光源          2-分束器          3-光纤线圈          4-相位调制器

- 5-合束器      6-探测器      7-消偏器      8-起偏器  
 9-光纤自由端      10-四探测器阵列      11-光纤线圈架  
 12-被测光纤端口      13-参考光纤端口      14-反射镜

## 具体的实施方式

参照图 1,为本发明的实施例一单轴 MZ 干涉式光纤陀螺仪的结构示意图。本发明采用的是用两臂对称的环状光纤(非谐振式)进行 M-Z 干涉的原理,它与 Sagnac 干涉式光纤陀螺以及谐振式光纤陀螺的原理完全不同。从 LD 半导体激光器发出的波长为  $0.8\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$  的激光 1 进入单模光纤  $F_1$  后被 3db 分束器 2  $SB_1$  分束后分别送到长度完全一样的两光纤信号臂  $S_1$  端口 1、1' 和  $S_2$  端口 2、2' 中,两光纤信号臂按同一圆心、同一直径  $D$  以相同绕制方法绕成光纤线圈 3,光信号分别从  $S_1$  臂的端口 1' 以及  $S_2$  臂的端口 2 输入,传输方向彼此反向,两信号臂的输出端 1, 2' 再与一 3db 合束器 5  $SB_2$  的两输入端连接,最后,两路干涉信号从光纤  $F_2$  送到光探测器 D 6 转换成电信号(单路输出形式);通过对输出电信号的测量即可获得陀螺旋转角速度的信息,输出电信号的交流电流分量  $i$  与陀螺绕光纤环旋转角速度  $\Omega$  间关系为:

$$i = A(I_1 I_2)^{1/2} \cos[2\pi LD\Omega / (\lambda c)] \quad (2)$$

其中  $I_1$ 、 $I_2$  分别为两信号臂光强,  $A$  为光电转换系数;  $L$  为光纤长度,  $\lambda$  为光波长,  $D$  为光纤线圈直径,  $c$  为光速。测量  $i$  的变化由(1)式即可求得陀螺旋转角速度  $\Omega$  (开环检测)。也可以通过相位调制器 4 补偿 Sagnac 相移构成闭环检测回路。

所述的传输光纤采用低损耗单模或保偏光纤,要求能够适合上述波长的激光进行低损耗、单模传输,用作光纤环与输入与输出光连接,为了提高系统的稳定度,需要光纤两信号臂相同长度,这需要通过光纤测长方法实现,本发明采用的具体测长方案是首先通过调制相位法粗测调整光纤长度使光纤两臂长度差达到 1cm 的探测精度,然后通过“白光”干涉法进行精测,研磨光纤使得光纤两臂长度差达到微米量级探测精度,最后通过相位调制器进行光纤长度补偿几乎实现零臂差。

相位法测量方法原理如下所述,测距仪在光纤输入端发出一个光信号,到达输出端后利用输出端的反射一部分光信号可以回到输出端,这个过程所用的

时间为 $\tau$ ，则光纤长度为：

$$L = \frac{c\tau}{2n_{eff}} \quad (3)$$

其中 $c$ 为光速， $n_{eff}$ 为光纤有效折射率。如果该光波信号为调制信号，调制频率为 $f$ ，回到输入端时发射波和反射波的相位变化为：

$$\Delta\phi = 2\pi f\tau \quad (4)$$

上述信号由 $N$ 个整波（ $2\pi$ 相位）和不足一个整波的相位 $\Delta N \times 2\pi$ 构成。结合上述两式可以得到：

$$L = \frac{\lambda}{2}(N + \Delta N) \quad (5)$$

通过多次试验可以确定 $N$ 和 $\Delta N$ ，上述方法探测精度可以达到毫米量级。

在此基础上采用“白光”检测技术可以使两光纤臂长度差的长度检测精度达到微米量级。系统示意图用图9表示，在“白光”检测技术中采用宽光谱的LED作为检测光源，相干长度为十余微米，利用参考臂和信号端口的两光纤的反射光相干光强确定信号端口的两光纤长度差。“白光”检测技术分为两步进行，首先是粗测过程，移动反射镜则参考臂的光程发生变化，当参考臂的光程同信号端口的一根光纤的光程几乎相等时，此时出现光信号的相干，记录此时的相干功率最大值所对应的反射镜位置 $x_1$ ，继续移动反射镜，随着参考臂同该光纤的光程差逐渐增大，反射光的相干性下降直至不能相干。继续移动反射镜当参考臂光程同另外一根光纤的光程接近时在此出现光信号相干，记录此时的相干功率对应的反射镜位置 $x_2$ ，则两信号臂光纤长度差为：

$$\Delta l = \frac{(x_1 - x_2)}{n_{eff}} \quad (6)$$

粗扫的量程决定于反射镜的扫描范围，测量精度决定于反射镜步进读数精度、光功率输出稳定度与光功率检测精度，且当 $\Delta l$ 小于光源相干长度的一半之后就两干涉峰值就难以分开。上述的一个实例是光纤臂长度相差为100um的白光检测，图10表示了其输出功率经过包络化后得到曲线。当光纤两臂差小于相干长度的一半时需要通过精测来测定光纤长度差，将被测光纤之一放入光学匹配液中，精细移动反射镜（如采用事先校准的电致伸缩陶瓷），记录干涉功率最大时的反射镜位置（如电致伸缩陶瓷上施加的电压），再将匹配液中光纤取出，将已测光纤置于匹配液中，重复上述测量，并记录反射镜位置。则利用

(6) 式可以计算出光纤长度差, 精测可以达到微米量级的测量精度。

其中光分束器 2 与合束器 5 采用两个  $1 \times 2$  的单模光纤或其它形式的分束器 (单路输出) 或一个  $1 \times 2$  的单模光纤或其它形式的合束器, 一个  $2 \times 2$  的单模光纤或其它形式的合束器, 分束比控制在  $50 \pm 5\%$  以内, 分别与输入 (或输出) 光纤和光纤环相连, 用作光纤分束与合束。

所述的光探测器 6 采用能够在上述选用的激光波长下对光信号进行高灵敏光电转换的半导体光电探测器, 用于将携带有陀螺旋转信息的光信号转换成电信号。

所述的相位调制器 4: 相位调制器实现工作点偏置作用, 在闭环检测中还实现相位补偿的作用, 相位调制器可以采用压电陶瓷制成光纤相位调制器也可采用  $\text{LiNbO}_3$  集成电光调制器。

其它: 光源隔离器、驱动器, 电信号放大与处理器以及计算机控制与数据处理等, 另外在单模光纤构成的光纤陀螺系统中需要加入消偏振方案所需的消偏器、起偏器等偏振控制器。

本发明的原理如下:

本发明与传统的 MZ 干涉仪的区别在于传统的 MZ 干涉仪采用同向传光方式, 不能够对角速率进行测量。本发明将两根光纤臂同向并排缠绕在线圈架上 (光纤线圈的骨架), 光源发出的光分成两束后, 分别接入两光纤臂的头 (光纤臂二的 2 端口) 尾 (光纤臂一的 1' 端口) 两端, 这样在光纤中就成了等效的正向反向传输的光路, 这样当系统旋转时传光方向与旋转方向相同的光纤臂的光纤长度等效于拉长, 而传光方向与旋转方向相反的光纤臂的光纤长度等效于缩短, 设系统旋转方向为光纤臂一的传光方向, 则此时两光纤臂长分别为:

$$\begin{aligned} L_{1\text{eff}} &= (2\pi NR + R\Omega t_1) \\ L_{2\text{eff}} &= (2\pi NR - R\Omega t_2) \end{aligned} \quad (7)$$

$R$  为光纤线圈的半径,  $N$  为光纤线圈的圈数,  $L = 2\pi NR$  为两光纤臂的实际长度。  $\Omega$  为系统角速率,  $t_1$ 、 $t_2$  分别光从输入端到输出端所用时间。以实验室为惯性参照系, 由于媒质发生相对运动产生斐索牵引, 使得在光纤中的光的传输速率为:

$$V_m = \frac{c}{n} \pm a_F R \Omega \quad (m=1,2 \text{ 当 } m=1 \text{ 时取 } + \text{ 号 } m=2 \text{ 时取 } - \text{ 号}) \quad (8)$$

$n$  为光纤折射率,  $a_F$  为斐索牵引系数  $a_F = 1 - \frac{1}{n^2}$ , 则可以推知两束光的相位

差：

$$\Delta\phi = \omega(t_1 - t_2) = \frac{4\pi LR\Omega}{\lambda c} \quad (9)$$

由此可见，式（9）和式（1）是完全一样的，不同的仅是式（1）中的 $l$ 是光纤线圈的全长，而式（7）中 $L$ 是光纤一个臂的长度。由上分析可知我们提出的MZ干涉式陀螺并不是传统干涉式陀螺以及MZ干涉仪的照抄，而是建立于MZ干涉原理基础上的干涉式陀螺的创新。

参照图2，为本发明的实施例二单轴MZ干涉式光纤陀螺仪的结构示意图，除两路干涉信号分别从光纤 $F_2$ 与 $F_2'$ 送到光探测器6 $D_1$ 、 $D_2$ 转换成电信号（平衡输出形式）外，其余均与例一同。

参照图7，为本发明的实施例四的单轴MZ干涉式光纤陀螺仪的结构示意图，本实施例的其余结构与例一同，但为了减小系统偏振噪声需要采用消偏振方案，在系统中的光源1至分束器2，分束器2与光纤线圈3之间放置消偏器7，消偏器7的作用是将部分偏振光转变为各个方向上分量相同的圆偏光，通常消偏器可以采用Loyt型光纤消偏器，它是用长度比为1:2，对应双折射主轴夹角为 $45^\circ$ 的两段高双折射保偏光纤制成。同时在分束器2与消偏器7之间及合束器5与探测器6之间还放有起偏器8。

在此基础上我们提出一种基于干涉条纹电子细分的检测方式，该种方式的结构示意图由图8表示出来。该结构与图1仅是光信号的输出方式不同，它并不采用光纤耦合器合束，而是采用光纤自由端的方式。这样和MZ干涉仪自由端类似，就会在输出平面上形成干涉条纹，我们采用四个点探测器构成探测器阵列，这四个探测器等间距合理放置，则刚好覆盖一个条纹间距，设四个探测器参数完全相同，四个探测器的输出滤出直流分量之后得到的信号 $U_1 \sim U_4$ 则满足：

$$\begin{aligned} U_1 &= A \sin \phi \\ U_2 &= A \sin\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \\ U_3 &= A \sin(\phi + \pi) \\ U_4 &= A \sin\left(\phi + \frac{3\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

在探测的信号的基础上，进行电子细分，电子细分一般用于光栅莫尔条纹的读数，该技术还没有运用于传感方面，利用电子细分可以获得较高的精度，电子细分的方法通常有倍频法，幅值分割法，相位调制细分，软件细分法，根据细分方法不同可以实现（2~数千细分），以最简单的乘法倍频（2 细分）电子细分方案为例，四个探测器相当于将条纹五等分，通过运算则得到：

$$U_A = U_1 - U_2 = 2A \sin \phi \quad (11)$$

$$U_B = U_4 - U_2 = 2A \cos \phi \quad (12)$$

将上述两信号相乘得到：

$$U_A U_B = 4A^2 \sin \phi \cos \phi = 2A^2 \sin 2\phi \quad (13)$$

这样相当于将信号  $\phi$  放大了一倍。在方法上，采用锁相倍频幅值分割法、相位调制细分、软件细分法等可以方便地实现 N 倍细分。相当于将信号放大 N 倍，在此基础上在进行信号的检测可以有效的提高系统探测精度。

在本发明的单轴光纤陀螺结构的基础上，我们可以获得完整的三轴光纤陀螺结构，它的原理示意图如图 3 所示，三轴光纤陀螺仪采用共用光源、光电探测器和一套电路处理系统的方案，通过例如分时移相调制等调制方法提取出不同的轴向上的转动信息，这可以大大节约系统成本，减小系统体积和重量。在图三中分别画出了三个光纤线圈，这三个光纤线圈分别被置于 XY、XZ、YZ 平面获取不同转动轴向上的转动信息。同理在三轴单模光纤陀螺中需要在相应的位置放置消偏器等偏振控制器。

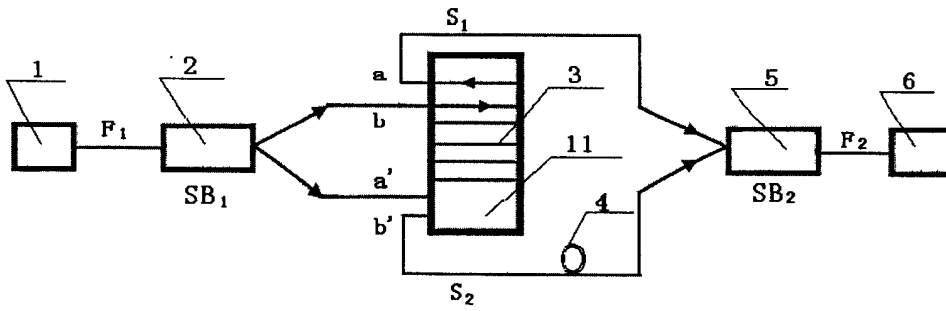


图 1

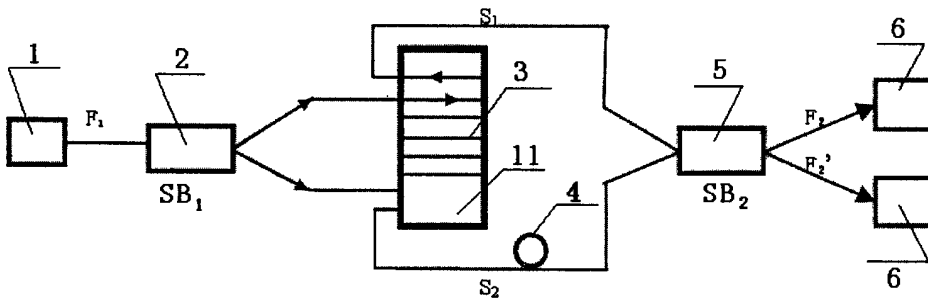


图 2

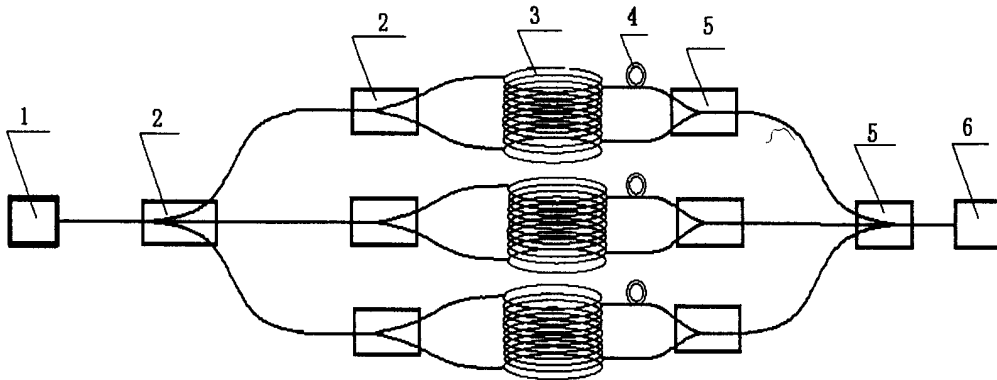


图 3

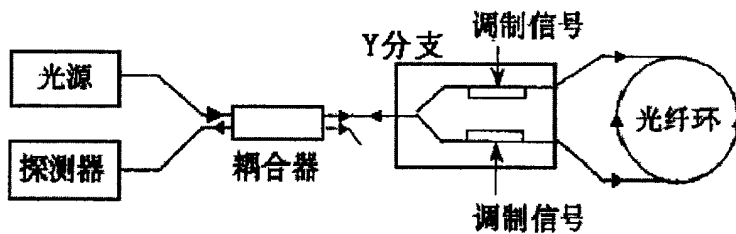


图 4

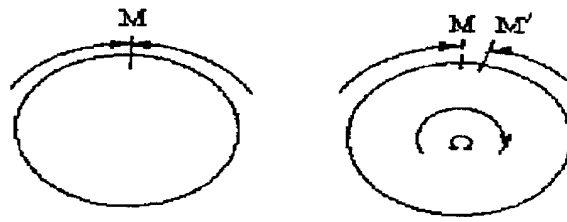


图 5a

图 5b

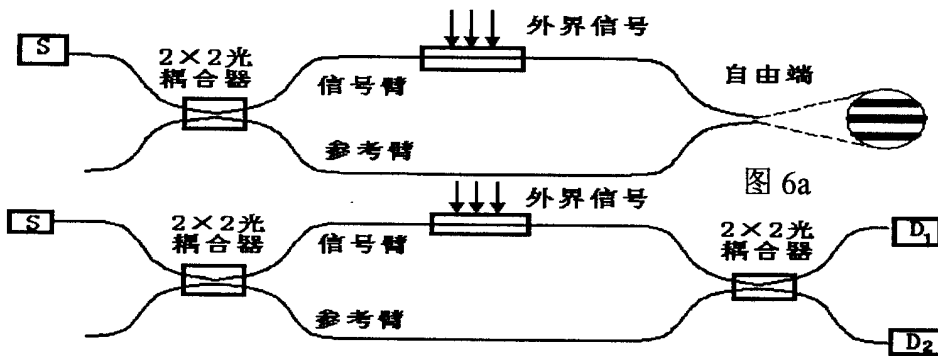


图 6b

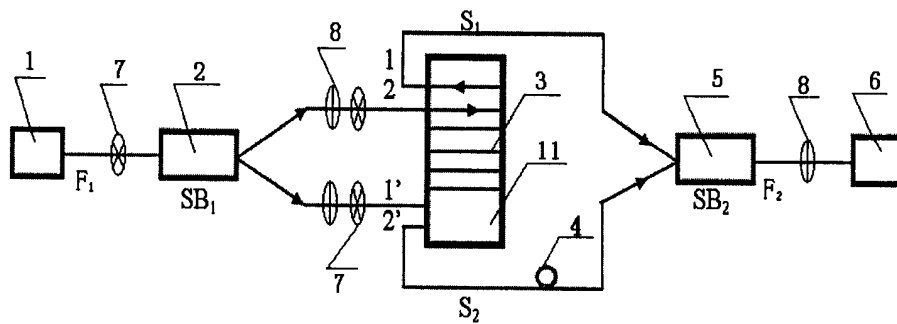


图 7

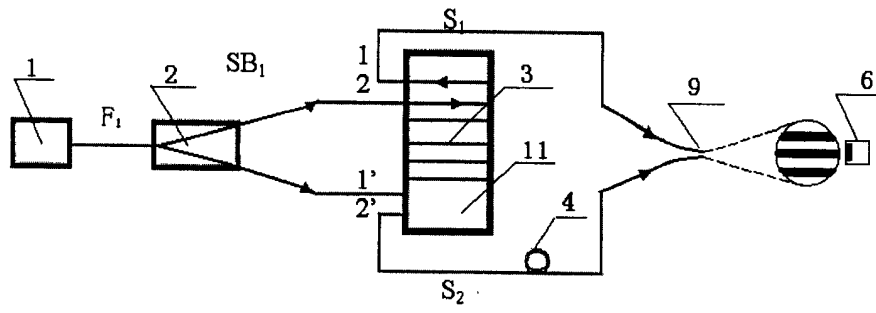


图 8

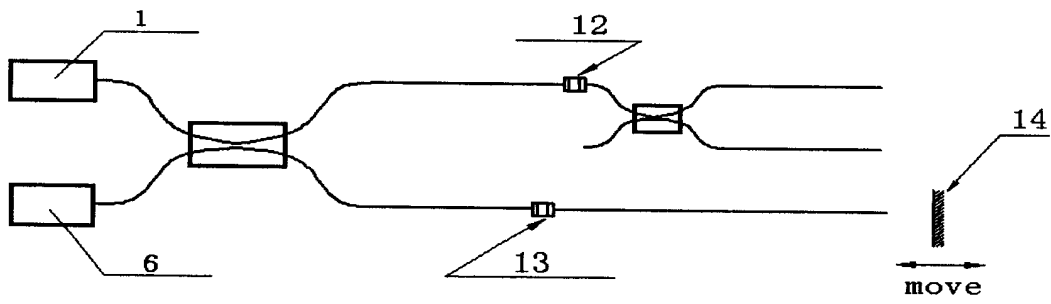


图 9

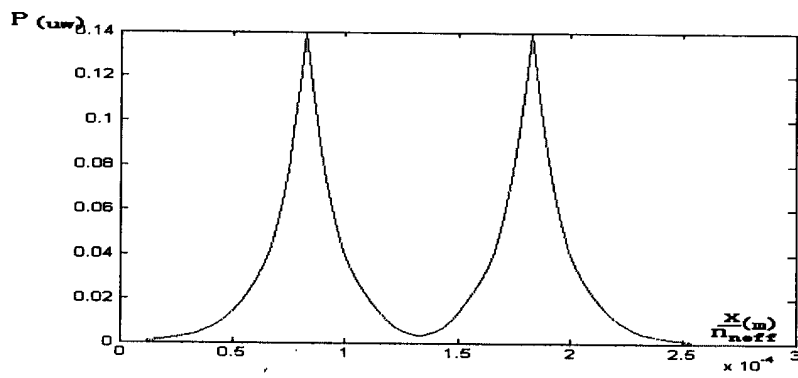


图 10