

级),最近人们开始注意高分子材料的光折变效应,并已获得一定的成功<sup>[11]</sup>。高分子材料在制备和加工上要较无机晶体容易得多。这种高分子光折变材料是在具有电光特性的高分子材料中掺入某种生色团化合物和光导材料组成,在光场作用下,由生色团分子产生的电子、空穴由光导体输运至不同位置,形成一内部场,内部场作用于具有电光特性的高分子材料而产生折射率变化。然而至目前为止,对于反饱和吸收、光折变效应等的详细的光物理过程并不清楚。例如,单重态和三重态吸收关系,分子交叉弛豫过程和双光子吸收对反饱和吸收的影响,反饱和吸收与非线性光折变的关系,光折变过程中电荷在高聚物中的输运及陷落过程,具有电光特性的高分子生色团分子以及光导体相互关系等,都还研究得不够深入,有些还很肤浅,有待

人们进一步深入研究。

- [1] S. Kivelson, H. B. Thacker and W.K. Wu, *Phys. Rev.*, B, **31**(1985), 3785.
- [2] T. Hasegawa et al., *Synth. Metals*, **41-43**(1991), 3151.
- [3] D. Bloor and F.H. Preston, *Phys. Status Solidi (a)*, **37**(1976), 427.
- [4] J. Orenstein and G.L. Baker, *Phys. Rev. Lett.*, **49**(1982), 10437.
- [5] J. Orenstein, S. Etemad and G.L. Baker, *J. Phys. C*, **17**(1984), L292.
- [6] B. Movaghar and N. A. Cade. *J. Phys. C*, **16**(1983), L807.
- [7] 彭景翠, *物理学报*, **40**(1991), 1980.
- [8] W. P. Su, J. R. Schrieffer, and A. J. Heeger, *Phys. Rev. B*, **22**(1980), 2099.
- [9] 彭景翠, *中国科学 (A)*, No. 11(1988), 1196.
- [10] Peng Jingcui, *Chinese Phys. Lett.*, **V10** (1993), 680.
- [11] S. Ducharme et al., *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991), 1846.

## 光纤陀螺仪及有关器件的研究

周世勤

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

介绍了一种大有发展前途的新型光电仪表——光纤陀螺仪,它在火箭、飞机和舰船的导航系统中,以及机械人、汽车和石油钻井领域中有着广泛的用途。分析了全光纤型、集成光学型和谐振腔型光纤陀螺仪,讨论了有关的器件和发展动向。

### 一、光纤陀螺仪是大有发展前途的新型光电仪表

随着高、新技术的发展,一种大有发展前途的新型光电仪表——光纤陀螺仪,1976年在美国犹他大学演示成功。十多年来,技术发达的国家争相研究光纤陀螺仪(FOG),并投入了大量的资金。

光纤陀螺仪的工作原理和激光陀螺一样,是基于 Sagnac 效应。即在同一闭合回路中,由同一光源发出的光,沿顺时针方向和沿逆时针

方向传播,其两束光的光程差、相位差与闭合回路的旋转角速度成比例。

激光陀螺仪在美国已经商品化,并且早已用于波音飞机的导航系统。国外有专家认为,环形激光陀螺仪(RLG)正逐步取代常规的机电式陀螺仪,将来环形激光陀螺仪又会被光纤陀螺仪所取代。据专家分析,美国就陀螺仪的产值来说,1986年机电陀螺仪占84%,RLG占16%;而到1996年,预计机电陀螺仪占27%,RLG占19%,FOG占54%。

光纤陀螺正以其独特的优点,显示出巨大的发展潜力。FOG没有机电陀螺仪的运动部件,对线加速度不敏感,在大过载加速度情况

下,工作特性不会变坏,可靠性高;动态测量范围宽,可达 $\pm 1\ 000^\circ/\text{s}$ ,这非常适合飞行器捷联惯性导航系统;不需要长时间准备,几乎是瞬时启动;可以采用集成光学技术,结构尺寸小,易于批量生产;抗干扰能力强;灵敏度高。由于 FOG 有这些特点,它被广泛用于火箭、飞机和舰船的惯性导航系统,是新一代的惯性导航仪表。此外,它还可以用于石油钻井的测量系统,汽车的速率测量,精密方位的校准和机器人的姿态控制。

美国利顿公司(Litton)研制的光纤陀螺仪在 $0.1^\circ\text{--}10^\circ/\text{h}$ 的应用领域已经成熟,并且已经工程化。例如已用于 LN-200 型惯性测量装置上,这种装置的环境温度为 $-55^\circ\text{C}\text{--}+80^\circ\text{C}$ ,并且可以工作在剧烈的振动和冲击的环境里。

日本日立公司 1991 年研制的光纤陀螺仪,可以用于石油钻井的随钻测量系统和在挖掘管道时按给定路线的测量系统中。这种光纤陀螺仪的阈值为 $0.001^\circ/\text{s}$ ,零漂优于 $0.1^\circ/\text{h}$ 。

德国 SEL 公司研制的光纤陀螺仪精度在 $10^\circ/\text{h}$ 左右。他们把主攻方向放在研制低成本、低精度的光纤陀螺仪上,以便尽快应用在汽车上。

此外,英国航空系统和设备公司、法国的 Photonetics 公司都已研制出 $0.5^\circ\text{--}10^\circ/\text{h}$ 范围的光纤陀螺样机,并已朝实用化方向发展。

## 二、全光纤型、集成光学型 和谐振腔型光纤陀螺仪

光纤陀螺仪的种类很多。按原理可以分为干涉仪型和谐振腔型;按结构可以分为分立元件型、全光纤型和集成光学型;按测量方法可以分为开环相位直接检测和闭环相位补偿测量。

干涉仪型 FOG 已经发展到实用阶段,其中发展较快的是全光纤型和集成光学型,而集成光学型是发展方向。谐振腔型 FOG 正在实验室研究,是很有前途的型式。

### 1. 全光纤型光纤陀螺仪

全光纤型光纤陀螺仪的结构原理如图 1 所示。

全光纤型 FOG 由光源、耦合器、相位调制器、光纤环圈、偏振器、偏振控制器、探测器和有关电路组成。

全光纤型 FOG,由于光全都在光纤中传播,光的模式变化状态比较简洁,模式控制比较

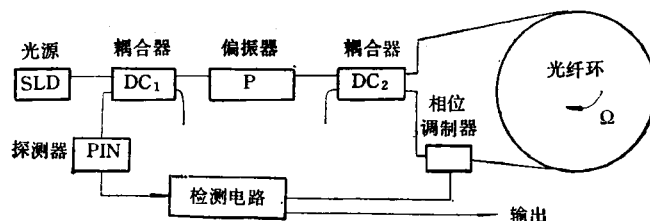


图 1 全光纤型 FOG 原理图

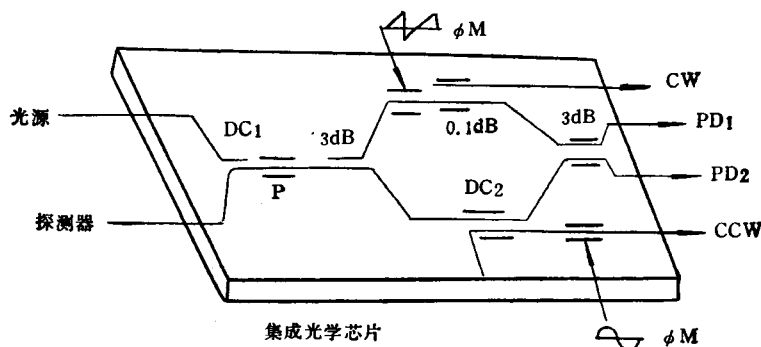


图 2 集成光学型 FOG 原理示意图

容易实现,光路准直问题相对容易解决,总体损耗较小.光路形成后,性能相对稳定,成本较低.

全光纤型 FOG 的主要问题是优良的总体性能与陀螺仪的装调技术密切相关,制造的难度与周期高于集成光学型,调制方式受带宽的限制.全光纤型的相位调制器,采用光纤缠绕在压电陶瓷环上(PZT),陶瓷环有较强的机械谐振,因而带宽受到限制,影响了精密调相.

## 2. 集成光学型光纤陀螺仪

集成光学型光纤陀螺仪是发展方向.现在美国、英国等主要研制 FOG 的厂家,大都采用这种型式.

集成光学型光纤陀螺仪的原理如图2所示.

集成光学型光纤陀螺仪由光源、集成光学器件、光纤环圈、探测器和检测电路组成.

美国的集成光学型光纤陀螺仪精度达到了 $0.0016^\circ/\text{h}$ ,用于无人驾驶的宇宙飞行任务中,替代机电式陀螺仪.

集成光学型光纤陀螺仪的集成光学芯片的相位调制器带宽较宽,比较容易实现精密调制和高精度信号处理.这种型式,由于光学元件集成化,有利于简化总体结构.在集成工艺成熟后,光纤陀螺仪的工艺简单,总体重复性较好,成本会明显下降,有利于实现工程化,是光纤陀螺仪的发展方向.现在看来,要实现高精度的集成光学型光纤陀螺仪,还需要作许多研究工作,特别是在稳定性和温度特性方面.

## 3. 谐振腔型光纤陀螺仪

全光纤型和集成光学型光纤陀螺仪都是属于干涉仪类型的.光纤陀螺仪的另一类有发展前途的是谐振腔型光纤陀螺仪.它是采用无源环型谐振腔,不是用长的多圈光纤环圈,而是用高锐度复循环光纤腔来增强 Sagnac 效应.这种谐振腔型 FOG,可以简化系统,减少光纤长度,降低成本,使结构紧凑.

谐振腔型 FOG 的原理如图3所示.

谐振腔型光纤陀螺仪的工作原理,更接近激光陀螺仪(RLG).谐振腔由光纤环圈和耦合器构成.从谐振腔两端射入光束,通过测量

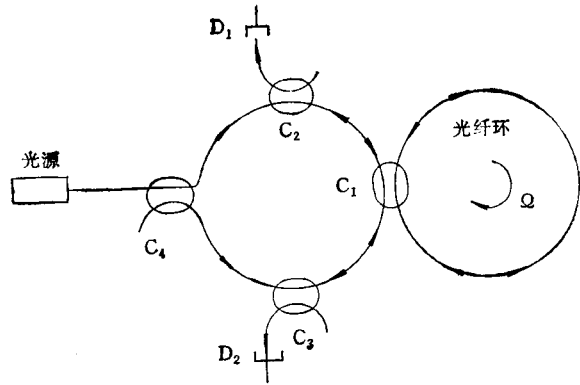


图3 谐振腔型 FOG 原理示意图

顺时针光束和逆时针光束谐振点的相位差,来测量旋转角速率.干涉仪型 FOG,采用低相干(宽频带)光源,光纤环圈一般在几百米长.谐振腔型 FOG 要求高相干(窄频带)光源,光纤环圈只用几圈,用几米长的光纤即可.

干涉仪型 FOG,无论是元器件,还是整机,技术上比较成熟,已经进入实用化和工程化.谐振腔型 FOG,对元器件有特殊要求,噪声源也有较大差异,必须分别加以研究.目前,谐振腔型 FOG,正处于实验室研究阶段.应当看到,这是一种有发展前途的小型化、低成本、高精度的光纤陀螺仪.现在,美国、日本等国正在积极研制.

在实际应用的全光纤陀螺仪和集成光学型光纤陀螺仪中,有不少场合是采用开环测量的方式.为了扩大测量范围、提高线性度,常采用闭环测量方式,这种方式又称为相位零化(置零)法.闭环光纤陀螺的优点是光纤陀螺的输出仅与相位差有关,而与光源的涨落无关,并且扩大了测量范围,提高了线性度.闭环光纤陀螺常用于较高精度的惯性导航系统中.

## 三、光纤陀螺仪的集成光学器件和光源

集成光学器件和光源是光纤陀螺仪的重要器件,器件性能的好坏直接影响光纤陀螺仪的精度.

## 1. 集成光学器件

集成光学器件是集成光学型光纤陀螺的关键器件。用于光纤陀螺的集成光学器件的关键技术有：包含偏振器、Y分支波导耦合器、相位调制器的多功能集成芯片，解决温度特性、稳定性问题，以及集成光学芯片与光纤(特别是保偏光纤)的耦合问题。

美国德雷珀实验室研制的集成光学型光纤陀螺仪，采用了多功能集成光学芯片和差拍检测光路。其原理如图4所示。

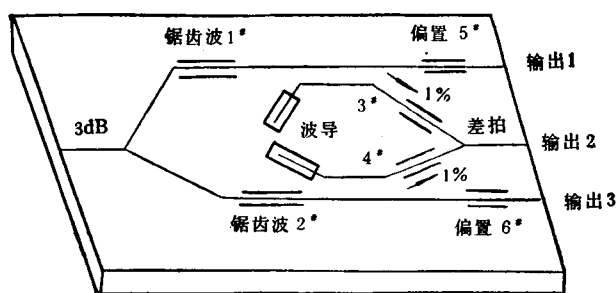


图4 多功能集成光学芯片示意图

图4所示的LiNbO<sub>3</sub>集成光学芯片，包括两个3dB Y分支耦合器、六个相位调制器、两个波导衰减器和一个偏振器。芯片是用退火质子交换法，在x切向LiNbO<sub>3</sub>晶片上制作的。退火质子交换法产生低损耗的波导，其消光比优于65dB，这可以提高光纤陀螺仪的偏置稳定性。Y分支的耦合器的分束比为50/50。

精心设计相位调制器的几何结构，可以降低半波电压和剩余光强调制。耦合光纤和芯片波导端分别抛成15°和10°角，以使波导接口处的背向散射小于60dB。这种耦合方式可以使接口耐用，并能经受恶劣的环境条件。据介绍，这种光路在-55℃至+85℃之间进行了重复性温度循环，插入损耗的波动小于1dB，并能经受强烈的机械振动和冲击。

## 2. 光源

光纤陀螺仪所用的光源，应具有较大的输出功率，以使FOG在测量旋转速率时，具有较高的精度和灵敏度；光源还应具有较宽的光谱宽度，以抑制光纤陀螺瑞利背向散射噪声和非

线性克尔效应感应的非互易相移；此外，光源还应具有良好的稳定性。

光源的好坏直接影响光纤陀螺的性能。因此，光纤陀螺技术研究的一项重要课题是进行光源和光源应用研究。

半导体激光二极管具有较高的输出功率和耦合效率，但相干性强，谱宽较窄。

发光二极管具有光谱宽、模式噪声小的优点，但其输出功率和耦合效率都较低。

半导体激光二极管和发光二极管，可以应用于低精度的光纤陀螺仪中，但在较高精度的情况下，却不适宜采用。

超辐射发光二极管(SLD)是正向工作的P-N结器件，在正向电流注入下，有源区内反转分布的电子与空穴或杂质复合，释放出光子，这种自发辐射的光子，在有源波导中传播时，经受光的放大。这种光增益是单程的，端面发出的，以非相干光为主。

超辐射发光二极管的性能，介于半导体激光二极管和发光二极管之间。它既具有较高的输出功率，又具有较宽的谱宽和比半导体激光二极管短的相干长度。因此，对于光纤陀螺仪来讲，超辐射发光二极管是比较理想的一种光源。

超辐射发光二极管的研究工作重点，是如何既提高器件的输出功率和效率，又能抑制下一模式的激射振荡，并减少相干性。为此，提出了各种的结构型式。例如，采用非注入吸收区结构、离子注入吸收区结构，在输出端面镀增透膜，采用倾斜条形有源区结构、楔形吸收波导结构和弯带吸收波导结构等。这些结构型式都是以无源吸收散射来抑制激射振荡，同时，采用较长的激活区长度，以获得较大的输出功率。

用于光纤陀螺仪的器件除上述集成光学器件和光源以外，还有保偏光纤耦合器、保偏光纤偏振器、PIN-FET光电探测器以及保偏光纤。器件的质量直接影响光纤陀螺仪的性能。因此，支持发展这些有关器件，才能加速光纤陀螺仪的研制工作，并且尽早实现工程化和实用化。

## 四、光纤陀螺仪发展动向

不断提高光纤陀螺仪精度, 尽快实现工程化和实用化, 以满足火箭、飞机、舰船惯导系统和汽车、机器人控制系统以及石油钻井测量系统的要求, 这是发展动向。美国国防部近年来确定了发展光纤陀螺技术的计划, 计划中规定1996年光纤陀螺仪精度达到  $0.01^\circ/\text{h}$ ; 2001年达到  $0.001^\circ/\text{h}$ ; 2006年达到  $0.0001^\circ/\text{h}$ 。如果这个计划能实现, 那么光纤陀螺仪将几乎占领火箭、飞机、舰船的惯导系统领域。光纤陀螺仪的瞬时启动、大测量范围、耐冲击、振动和大加速度特性, 又将广泛应用于能源的开发(石油钻井测量)、交通运输(汽车)和高技术(机器人控制)。因此, 具有巨大的发展潜力和广阔的市场。

### 1. 光纤陀螺仪多轴化

在实际应用的惯导系统中, 通常装有三个互相垂直的光纤陀螺仪。例如, 德国 LITEF 公司研制的 LFS-90 惯导系统装有三个 K-2030 型光纤陀螺仪。这三个光纤陀螺仪组合在光学结构上, 共用一个光源和一个耦合器, 并且各含有一个光纤传感环圈和探测器。

LFS-90 系统的光纤陀螺仪组合由五个模块组成, 即三个传感模块, 一个光学模块和一个电路模块。

传感模块由光纤环圈和多功能集成光学芯片构成。多功能集成光学芯片上制有偏振器、分

束器和相位调制器, 它的一端经过光纤连接光学模块。三个传感模块封装在同一磁屏蔽套内, 并采用同一结构安装。

光学模块由光源和带有前置放大器组件的光电探测器所组成。

电路模块包含有三个光纤陀螺仪所需要全部伺服电路。其功能包括: 调制信号发生器、Sagnac 相移的补偿、数字滤波以及接口等。

### 2. 低成本光纤陀螺仪

低成本的光纤陀螺仪, 广泛用于汽车速率的测量以及石油钻井的测量系统。

日本松下公司研制的光纤陀螺仪, 采用成本低的单模光纤和消偏技术, 成本较低。

德国宇航公司采用  $3 \times 3$  耦合器, 光源为 ELED, 工作波长为  $1.3\mu\text{m}$ , 出纤功率为 20MW; 采用 InGaAs 的 PIN 探测器, 制成了低成本光纤陀螺仪。

### 3. 检测电路数字化

美国霍尼韦尔公司研制的高性能光纤陀螺仪采用了全数字闭环电路, 光纤陀螺仪的偏值稳定性达到  $0.003^\circ/\text{h}$ 。

德国利特夫公司研制的 LFS-90 型光纤陀螺惯导系统, 采用了模拟电路和数字电路。其数字信号处理器包括时钟电路、可编程存储器、程序和数据存储器、专用集成电路和接口。

[1] O. M. Laznicka and P.G. Suchoski, *SPIE*, 1585 (1991), 182.

[2] George A. Pavlath, *SPIE*, 1585 (1991), 2.

## $\alpha$ 粒子背散射从低能到高能的新发展

汤家镛 杨福家

(复旦大学李政道物理综合实验室, 复旦大学物理二系, 上海 200433)

人们对原子结构的认识离不开  $\alpha$  粒子的背散射实验。几十年以后,  $\alpha$  粒子背散射分析成为离子束分析的一种重要手段。从 80 年代后期开始, 为了提高轻元素(特别是重基体中的轻元素)的探测灵敏度,  $\alpha$  粒子背散射分析又经历了从低能(1—2MeV)到高能(直至 9MeV)的发展。从实验上说, 高能  $\alpha$  粒子背散射分析已经有了不少成功的应用, 但由于大量共振峰的出现, 激发曲线的理论计算十分复