

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0017-04

LD抽运的全固体激光陀螺实验研究

孙利群, 田芊, 章恩耀, 郭宏, 万顺平

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 随着LD技术的不断发展,LD抽运的全固体激光陀螺将以其高精度、低成本、小型化的特点而有望成为21世纪光学陀螺发展的主流。介绍了激光陀螺的工作原理,分析了LD抽运的全固体激光陀螺的响应特性,给出了LD抽运全固体激光陀螺的实验装置及初步的实验结果。

关键词 测绘仪器; 环形激光器; 激光二极管(LD); 光学陀螺; 固态; 抽运

中图分类号 V241.5*58

文献标识码 A

Experimental Study on LD Pumped Solid State Laser Gyro

SUN Li-qun, TIAN Qian, ZHANG En-yao, GUO Hong, WAN Shun-ping

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract With the development of laser diode (LD) technology, LD pumped solid state laser gyroscope (LDPSSLG) will be promised to become a main kind of optical gyroscope in the 21 century. Principle of LD pumped solid state laser gyroscope is introduced, the response property of LDPSSLG is analyzed. Experimental apparatus of the LDPSSLG is set up and the experiment result is discussed.

Key words mapper; ring laser; laser diode (LD); optical gyroscope; solid state; pumping

1 引言

陀螺仪作为惯性测量器件,是惯性导航及制导技术的核心。传统的机电转子陀螺依据普通的刚体力学原理,按照机械储能方式工作。由于高速转子容易产生质量不平衡问题,容易受到加速度的影响,而且需要一段预热时间转速才能达到稳定等。“转子”陀螺本身不能克服的缺陷,促使“非转子”陀螺应运而生。

光学陀螺实际上是一种摒弃了“转子”而具有陀螺功能的光电装置,以其启动迅速、性能稳定、抗干扰能力强、测量动态范围宽等诸多优点^[1]而备受青睐。在光学陀螺的研究发展中,相继研制成功的有气体激光陀螺、光纤陀螺以及正在研究的光波导陀螺。

气体激光陀螺已有30年的研究历史,它的优点是测量精度高,其零漂稳定性可以达到 $0.001^{\circ}/h^{[2]}$,是目前光学陀螺中精度最高的。但气体激光陀螺有其固有的缺点,气体增益介质(He-Ne混合气体)决

定了它使用寿命受限、“闭锁”现象本征存在、生产成本高、难以实现小型化。

光纤陀螺虽然已实现了全固体化,在实验研究上取得了重大进步,并在一定范围内得到了应用;但受其各种关键器件、关键工艺的影响及其他因素(如光源、光纤及各种光电器件、偏振态及各种光纤非线性效应等)的限制,其精度及稳定性等较难以得到改善。尤其是光纤陀螺采用多圈光纤,因此系统温度、压力效应很强且难于得到改善,亦难以实现小型化。

集成光波导陀螺的研究工作刚刚开始并受到重视,究其原因,除了宜小型化、易贮存、温度效应可抑制等因素外,还有两个主要原因:一是在光波导谐振腔内的光强很弱,各种光学非线性现象在相当程度上减弱了;二是它便于实现光电子集成化,可降低成本。但集成光波导制作工艺本身还不成熟,尤其是离制作集成光波导陀螺的要求还相差很远,因而集成光波导陀螺的现实基础还很弱。

基金项目: 清华大学基础研究基金(JC2001015)资助项目

作者简介: 孙利群(1964-),男,副研究员,主要从事激光技术、光纤传感技术及非线性光学技术研究。

E-mail: sunlg@pim.tsinghua.edu.cn

随着 LD 技术的不断发展,LD 抽运的全固体激光器(LDPL)成为当今激光器的主要发展方向。LD 抽运的固体激光陀螺不仅可以保持激光陀螺高精度的优点,还可以实现全固体、低成本、小型化,因此,LD 抽运的全固体激光陀螺有希望成为 21 世纪光学陀螺发展的主流。

2 激光陀螺的工作原理

光学陀螺的基本工作原理是 Sagnac 效应。如图 1 所示,在一圆形环路(周长 $L=2\pi R$)中,分别沿顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传播两束光;当此环路自身有转动时,这两束光将具有不同的光程长度而产生一个光程差 $\Delta L=L_{CW}-L_{CCW}$, (或时间差 $\Delta t=t_{CW}-t_{CCW}$),由该两束光形成的干涉相位差(或谐振时形成的谐振频率差),与环路转动角速度 Ω 有一定的内在联系。因而可以测量位相差(或频率差)来获知此环路(固联在载体上)相对惯性空间的角速度。

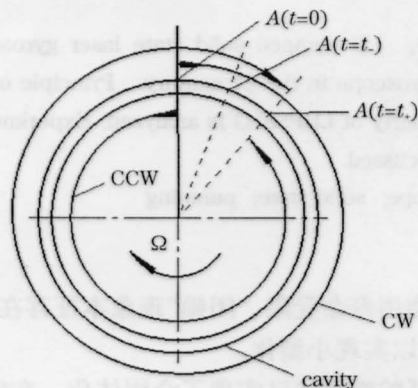


图 1 Sagnac 效应原理图

Fig.1 Schematics of Sagnac effect

设在真空中光速为 c , 沿环路相反方向传播一圈的两束光的光程分别为:

$$L_{CW}=2\pi R+R\Omega t_{CW}, \quad L_{CCW}=2\pi R-R\Omega t_{CCW};$$

因 $L_{CW}=ct_{CW}, L_{CCW}=ct_{CCW}$, 有时间差 Δt

$$\Delta t=t_{CW}-t_{CCW}=\frac{2\pi R}{c-R\Omega}-\frac{2\pi R}{c+R\Omega}\approx\frac{4\pi R^2}{c^2}\Omega,$$

由于环路面积 $A=\pi R^2$, 则

$$\Delta t=(4A/c^2)\Omega;$$

亦即有光程差

$$\Delta L=(4A/c)\Omega.$$

在光学谐振型陀螺中,与 ΔL 相应的非互易相移(频率差) $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu=\frac{\nu}{L}\cdot\Delta L=\frac{4A}{\lambda L}\Omega, \quad (1)$$

(1)式表明,在任意几何形状^[9]的闭合光路中,由

于该闭合环形光路相对于惯性空间的旋转,沿相反方向传播的两行波的频率差(或相位差)的大小与闭合光路的转动速率成正比。这就是 Sagnac 效应,它是激光陀螺、光纤陀螺及其他光学陀螺的基础。

3 光路设计

LD 抽运的全固体激光陀螺的基本光路如图 2 所示。半导体激光二极管(LD)发出的 808 nm 波长的光,被扩束镜(L_1)展宽,整形棱镜(P_1, P_2)整形后,经聚焦透镜(L_2)、球面镜(M_1)聚焦在增益介质(G)上。增益介质(Nd:YVO₄晶体)有效吸收抽运光的能量后,辐射出 1.064 μm 波长的荧光,经球面反射镜(M_1, M_2)和平面反射镜(M_3, M_4)组成的环形腔谐振放大,形成 1.064 μm 的双向行波振荡。双向激光束由输出平面镜(M_4)耦合输出,一路经光学延时器(O)延时后,两束光在半透、半反分束片(BS)上合成一束。用光电探测器(D)接收合光后的拍频信号,经信号放大器放大、信号读出电路处理后,给出载体的角速度信息。

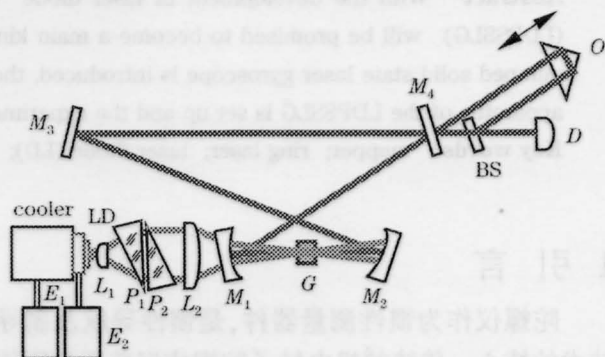


图 2 激光二极管(LD)抽运的全固体激光陀螺原理示意图。

LD:激光二极管;cooler:制冷器; P_1, P_2 :整形棱镜; L_1 :扩束镜; L_2 :聚焦透镜; M_1, M_2 :球面镜反射镜; M_3, M_4 :平面反射镜; O :光学延时器;BS:分束片; G :增益介质(Nd:YVO₄晶体); D :光电探测器; E_1 :LD 驱动电路; E_2 :制冷器电路

Fig.2 Principle schematics of LD pumped solid state laser gyro. LD:laser diode; cooler:semiconductor cooler; P_1, P_2 :prisms; L_1 :concave lens; L_2 :focusing lens; M_1, M_2 :spherical mirror; M_3, M_4 :flat mirror; O :optical delay prism; BS:beam splitter; G :gain medium (Nd:YVO₄ crystal); D :photodetector; E_1 :LD driver circuit; E_2 :cooler circuit

由于谐振腔形状类似“8”字,故称之为“8”字型腔。上面的大三角形面积与下面的小三角形面积之差为激光陀螺的有效面积。

4 响应特性分析

激光陀螺的响应特性主要包括灵敏度、极限精度和动态范围等。

4.1 固体激光陀螺的标度因数

从激光陀螺对转动速度测量的原理公式(1),可以得到载体角速度 Ω 与激光陀螺频差 $\Delta\nu$ 的关系:

$$\Omega = \frac{\lambda L}{4A} \Delta\nu, \quad (2)$$

比例因子 $\frac{\lambda L}{4A}$ 一般称为激光陀螺的标度因数。

以图 2 中所示的“8”字型腔为例,若腔长 L 为 30 cm(惯性导航级激光陀螺的典型尺寸),则有效面积 A 约为 22 cm²。对于 $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ 波长的光而言,标度因数 k 为

$$k = \frac{\lambda L}{4A} = 7.5 \text{ [}^\circ\text{/h]/Hz}$$

4.2 固体激光陀螺的灵敏度

由(2)式可知,激光陀螺可以测定的最小角速度取决于环形激光器瞬时的谱线宽度 $\delta\nu$,即

$$\Omega_{\min} = \frac{\lambda L}{4A} \delta\nu, \quad (3)$$

而激光器瞬时的谱线宽度 $\delta\nu$ 又由环形谐振腔空腔谐振线宽 $\Delta\nu_c$, 激光输出功率 P_0 和激光波长 λ 决定,即^[4]

$$\delta\nu = 2\pi \frac{(\Delta\nu_c)^2 h\nu}{P_0} \quad (4)$$

其中, $h\nu$ 为光子能量。由激光理论可知,连续激光器瞬时激光谐振腔输出的激光谱线宽度相当窄,其典型值为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ Hz。

对于上例中的“8”字型腔激光陀螺(设腔长 L 为 30 cm)来讲,可能测出的最小转速

$$\Omega_{\min} = \frac{\lambda L}{4A} \delta\nu \approx 0.075 \sim 0.00075 \text{ [}^\circ\text{/h]}$$

由此可见,LD 抽运的固体激光陀螺具有极高的灵敏度。

4.3 固体激光陀螺的精度极限

激光陀螺的精度极限,最终取决于自发辐射这种非相干噪声对激光频率的影响。而自发辐射是与受激过程同时发生的、不可排除的量子噪声,造成激光陀螺的精度极限,通常又称为量子噪声极限。

量子噪声对激光频率的影响,表现为激光频率有一极限线宽 $\delta\nu$,如(4)式所示。这种极限线宽意味着反向行波的频率将有随机的波动。在直腔、驻波激光器中,这种微小的波动将被腔体受环境的影响完全淹没。但在环形腔、行波激光器中,由于环境的

影响对振荡在同一环形谐振腔中的反向行波是相同的,并互相抵消。于是这种微小的量子噪声得以表现出来。

可以证明,激光陀螺对转速 Ω 的测量精度极限 $\delta\Omega$ 相应地取决于 $\delta\nu$,即^[5]

$$\delta\Omega = \frac{\lambda L}{4A} \left(\frac{\delta\nu}{\pi\tau} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中, τ 为测量时的取样平均时间。显然 $\delta\nu$ 越小,取样时间 τ 越长,则可以获得的极限精度就越高。对于图 2 所示的“8”字腔激光陀螺(以腔长 $L=30$ cm 为例),若取样时 $\tau=1$ s 间秒,当 $\delta\nu=10^{-3}$ Hz 时,可以获得的测量精度为 $\delta\Omega \approx 0.13$ [°/h]。

对于一台环形激光器,通过减小空腔谐振线宽 $\Delta\nu_c$ (增大无源腔的品质因数 Q_c),提高激光输出功率 P_0 ,延长取样时间 τ ,都可以使极限精度值下降。

4.4 固体激光陀螺的动态范围

由(2)式可以发现,激光陀螺从原理上讲可能测量的最高转速 Ω_{\max} 取决于激光器的谱线增益有效宽度(即振荡阈值以上的增益宽度) $\Delta\nu_{\text{gain}}$:

$$\Omega_{\max} = \frac{\lambda L}{4A} \Delta\nu_{\text{gain}} \quad (6)$$

但当增益谱线宽度 $\Delta\nu_{\text{gain}} > \Delta\nu_{\text{longit. mode}}$ 时,一般要采用适当的选单纵模技术确保环形谐振腔内单纵模运转。因此,激光陀螺能够测量的最高转速 Ω_{\max} 可以用纵模间隔 $\Delta\nu_{\text{longit. mode}}$ 来估算。腔长为 30 cm 的环形谐振腔的纵模间隔 $\Delta\nu_{\text{longit. mode}} \approx 10^9$ Hz,所以图 2 中所示的“8”字型腔固体激光陀螺可以测量的最高转速为

$$\Omega_{\max} = \frac{\lambda L}{4A} \Delta\nu_{\text{longit. mode}} = 7.5 \times 10^9 \text{ [}^\circ\text{/h]} \approx 2 \times 10^6 \text{ [}^\circ\text{/s]}$$

显然能够满足任何一种实际应用要求。

从前面的讨论已知,图 2 中所示的“8”字型腔固体激光陀螺可能测出的最小转速为 0.1 °/h,由此可见,LD 抽运的全固体激光陀螺的测量动态范围相当宽,最高可达 10^{10} 。

5 初步实验结果

LD 抽运的全固体环形激光陀螺采用最大功率为 3W,峰值波长为 808 nm 的 LD 激光器作为抽运源。增益介质采用吸收波长与 LD 峰值波长相匹配的 Nd:YVO₄ 晶体,是由于 Nd:YVO₄ 对 808 nm 抽运光的吸收系数大,而且吸收系数对抽运光波长的变化不灵敏,并可以直接产生偏振光输出。Nd:YVO₄ 晶体的两个端面镀 808 nm 和 1.06 μm 的双波长增透膜,晶体侧面用铝箔包裹并置入铜块内,以达到良好

的散热效果。

谐振腔由两个曲率半径为 100 mm 的凹面镜和两个平面镜构成,四面反射镜均镀有 1.06 μm 的反射膜,“8”字形谐振腔的腔长为 690 mm。当抽运光功率为 0.5 W 时开始有激光输出,抽运光功率为 0.6 W 时能形成稳定的双向振荡。抽运光功率为 2.4 W 时所形成的双向稳定输出功率大于 4 mW。

LD 抽运的全固体环形激光器双向输出的激光束经合光后可以形成稳定的干涉图样(如图 3 所示),随着全固体环形激光器基座转动方向的不同,可以观察到干涉条纹向不同的方向移动,因而证明了该实验装

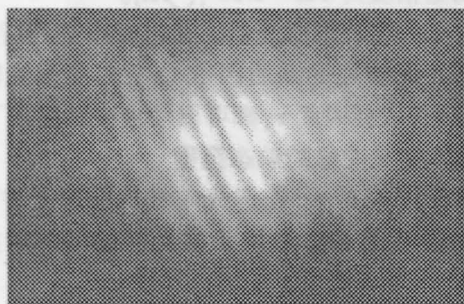


图 3 双向输出光束的干涉图样

Fig3 Interference pattern of bidirectional output laser beams

置可以用于转动角速度测量,实现陀螺的功能。

6 结 论

以激光二极管(LD)抽运的环形固体激光器为主体构成的激光陀螺可以说是最为经济和最容易实现商品化的仪器。与其他类型的光学陀螺相比较,它具有高精度、低成本、易小型化的特点。本文通过实验研究了 LD 抽运的固体激光陀螺的可行性,获得了 LD 抽运的环形固体激光器连续波双向稳定输出及合光后的干涉条纹,并观察到了条纹移动的陀螺效应,为进一步实现小型化全固体激光陀螺奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 杨培根,龚智炳. 光电惯性技术[M].北京:兵器工业出版社, 1999. 6
- 2 郑露滴,汤全安,章燕申. 环形激光陀螺的现状和发展[J].中国仪器仪表学报,1995, (4):4-5
- 3 姜亚南. 环形激光陀螺[M].北京:清华大学出版社,1985.13-14
- 4 [俄]谢列金. 激光陀螺及其应用[M].北京:航空工业出版社, 1994.54
- 5 J. Micheal. *PhD Dissertation* [D]. University of New Mexico, USA, 1997