LD 侧泵固体激光陀螺仪方案 * *

万顺平[1] * *, 孙利群[1], 田 芊[1], 章恩耀[1], Vaclav Kubecek[2]
(1. 清华大学精仪系,精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084; 2. 捷克工业大学核科学与物理工程学院,布拉格 7-115 19)

摘要:提出一种 LD 侧泵固体激光陀螺仪方案,由泵浦装置、三角形环形腔、增益介质、F-P 标准具、电光晶体、合光部分及读出电路组成。分析了环形腔稳定条件和腔内光束介质;采用电光晶体产生电光抖动减少陀螺仪的锁区;讨论了激光器器件选择及系统工作原理。方案能较好地克服热应力问题且环形腔没有负面积;使用切成布氏角的晶体增益,可实现全固态激光陀螺;可利用气体激光陀螺仪的现成工艺。
关键词:LD 泵浦固体激光器; 环形激光器; 双向; 速度传感器; 光学陀螺仪; 电光调制
中图分类号:TN248.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-0086(2004)11-1324-05

Novel Scheme of LD-pumped Solid-state Laser Gyro

WAN Shun-ping[1] * *, SUN Li-qun[1], TIAN Qian[1], ZHANG En-yao[1], Vaclav Kubecek[2]
(1. Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100084, China: 2. Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University, Brehova 7-115 19 Prague 1, Czech Republic)

Abstract: A novel scheme design of LD-pumped solid-state laser gyro was proposed. It is composed of pump system, triangle ring cavity, laser media, F-P etalon, electro-optic crystal, beam combination optics and read-out system. Cavity stability is analyzed and beam distribution is shown. To decrease lock-in threshold, electro-optic crystal is exploited to generate electro-optic dithering effect. Cavity optics choice and its operation principle are discussed in the paper. The scheme has the advantage of avoiding thermal stresses and minus area in the cavity; all-solid-state laser gyro can be built up by employing solid state laser media with Brewster's angle at the ends and the laser cavity can be manufactured by the similar technology widely used in He-Ne laser gyro production.
Key words: LD-pumped solid-state laser; ring laser; bidirectional; rotation sensor; optical gyro; electro-optic modulation

1 引 言

光学陀螺从原理上分为谐振型和干涉型两种。前者的代表是 He-Ne 气体激光陀螺,它是一种导航级光学陀螺;后者的代表是由多圈光纤构成的光纤干涉仪为核心的光纤陀螺[1]。气体激光陀螺仪增益为气体,其精度难以进一步提高。随着固体激光技术的发展,特别是单块(monolithic)固体激光技术的进步,窄线宽、高功率激光输出及稳频技术等的发展推动了固体激光陀螺技术的研究。1999 年,Halldorsson 等[3]提出的 3 自由度 LD 泵浦固体激光陀螺仪,使用多个 LD 作为泵浦光源,环形腔为单块玻璃的矩形腔,增益介质使用 3 价稀土金属的晶体(掺 Nd^{3+}),激光工作在连续模式,采用声光移频技术减少测量锁区,其优点是使用固体增益取代了气体增益,采用光学的方法取代机械的方法减少锁区。Diels[3]提出了一种 LD 泵浦脉冲锁模固体激光陀螺仪,采用 LD 端面泵浦方式,使用反射镜构成 8 字形环形腔,以及多量子阱饱和吸收体(MQW)作为锁模器件。由于激光工作在脉冲模式,经过合理的谐振腔设计,腔中反向传播的两

* 收稿日期:2004-02-11 修订日期:2004-05-19
* 基金项目:清华大学基础研究基金资助项目(JC2001015)
* * E-mail: wansp00@mails.tsinghua.edu.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

路光脉冲不会在构成谐振腔的光学元件上相遇,避免了双向光束的能量耦合造成的闭锁,本征地消除了锁区;由于脉冲光不可避免地在 MQW 上产生背向散射而发生能量耦合,该激光陀螺仪使用方波调制信号进行电光调制获得偏频效果,减少闭锁。缺点是由于采用 LD 端面泵浦方式,环形腔很难进一步小型化;由于端面泵浦采用 8 字形腔,存在负面积,陀螺仪的标定因子将减小;端泵方式会引起晶体增益的热应力不均,导致陀螺仪寿命降低。

本文提出一种 LD 侧面泵浦固体陀螺仪方案及其电光调制方法,由等边三角形环形腔反射镜组、泵浦装置、增益介质、F-P 标准具、电光晶体、分束板、棱镜及读出电路组成。采用侧面泵浦,能较好地克服热应力;使用晶体增益,可实现全固态激光陀螺;环形腔为三角形腔,没有负面积,其结构和气体激光陀螺仪相似,可充分利用气体激光陀螺仪的现成工艺。采用电光晶体,产生电光抖动来减少陀螺仪锁区。

2　原理和方案设计

2.1　原　理

光学陀螺仪基于 Sagnac 效应原理工作。光波在谐振环形腔内同时沿顺时针(cw)和逆时针(ccw)方向传播,形成反向传播的两束行波。谐振腔相对惯性空间有转动时,这两束光波将有不同的光程长度,形成两束不同频率、反向传播的行波。通过检测 cw 和 ccw 的干涉信号或拍频信号,可以量测谐振腔(固定在载体上)相对于惯性空间的角速度[4],有

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \Delta\nu = \frac{4A}{c\lambda}\Omega \qquad (1)$$

式中:$\Delta\varphi$为相位差;$\Delta\nu$为反向传播两束波的频率差;A 为谐振腔面积;c 为光速;λ为光波长;Ω为角速度。

2.2　方案设计

图 1 是 LD 侧面泵浦固体激光陀螺仪方案图。泵浦装置采用侧面泵浦,由聚焦耦合透镜、LD 阵列以及 LD 温控装置组成。环形腔由 2 个曲面镜和 1 个平面镜组成的等腰三角形腔。为减少闭锁阈值,腔内插入 2 块同等参数的电光晶体对称地放置于等腰三角形的腰上。LD 温控装置由半导体致冷片、散热片、热敏电阻和温控电路组成。

实现单纵模运转:使用适当的 F-P 标准具选择单纵模,包括反射率和间距。F-P 标准具应放置于光束发散角变化平缓处,这里选择放置于增益介质附近,并倾斜一小角度。

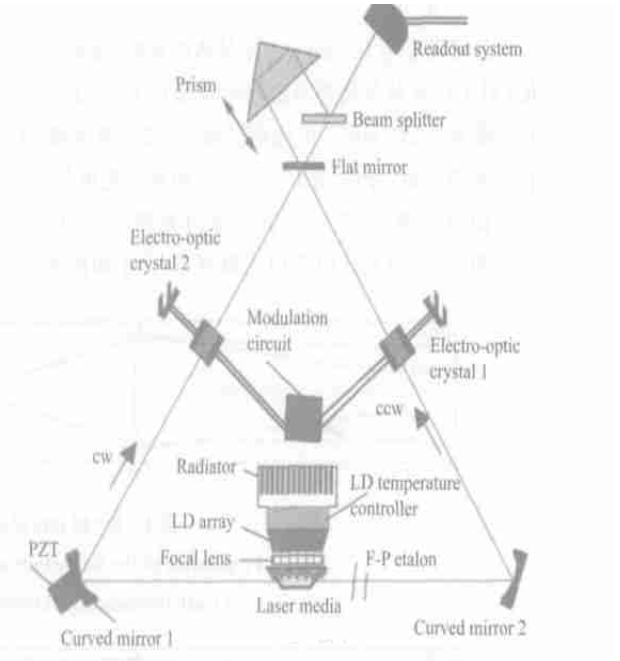


图 1　LD 侧面泵浦固体激光陀螺仪方案

Fig. 1　Schematic diagram of LD-pumped solid-state ring laser gyro

器件选择:LD 阵列为 GaAlAs/ GaAs 双异质结激光器阵列,固定在 LD 制冷器上,并用温控系统控温。增益介质 $Nd:YVO_4$,掺杂浓度≈0.5 %;几何形状为板条,尺寸 10 mm ×3 mm ×3 mm;为抑制由于晶体端面垂直光轴引起晶体内驻波振荡以及减少由晶体表面散射引起的闭锁,两端面按布氏角(62.94°)切成,泵浦输入面(3 mm ×10 mm 的面)镀对波长 808 nm 反射率不高于 1 %和对波长 1 064 nm 反射率不低于 98 %的双色膜。为防止寄生振荡,泵浦输入面的相对面打磨。晶体用铟箔包裹(以达到良好的热接触)置入铜块内,并放置于两曲面镜之间的中点位置,此铜块用半导体制冷器冷却并控温。柱面镜选择合适的焦距。曲面镜和平面镜镀 HR @1 064 nm 的介质膜。棱镜和分束板用于合光。读出电路用于读出拍频信号。电光调制所用电光晶体为两块同等参数的电光晶体,采用端面镀对波长 1064 nm 反射率不高于 0.2 %高透膜的 $LiNbO_3$ 电光晶体。

2.3　谐振腔稳定性

采用 ABCD 传输矩阵进行谐振腔稳定性分析。设等边三角形的环形腔边长为 L,曲面镜曲率半径为 R,由谐振腔稳定条件[5]$|A + D| < 2$,可以得出谐振腔的稳定性条件为(没有考虑晶体对腔稳定的影响)

$$4L/\sqrt{27} < R < \sqrt{3}L/2 \qquad (2)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$R > 4L/\sqrt{3} \quad (3)$$

L 可以取为 100 mm;考虑晶体的影响,使用 PARAXIA-Puls 软件估算稳定腔范围为 76 mm < R < 85 mm 或 R > 231 mm。在稳定区域,可以计算谐振腔内光束的分布。图 2 为 R = 80 mm 时腔内光束分布,子午面内光腰 0.05 mm,弧矢面内光腰 0.06 mm。图 3 为 R = 300 mm 时腔内光束分布,子午面内光腰 0.26 mm,弧矢面内光腰 0.25 mm。当 R = 1 000 mm 时,腔内光束分布如图 4 所示,子午面内光腰 0.30 mm,弧矢面内光腰 0.32 mm。通过上述分析,选取 R = 1 000 mm 比较合适,此时子午面和弧矢面腰斑相近,腔内光束象散小,腔模体积较大,能充分利用泵浦能量。

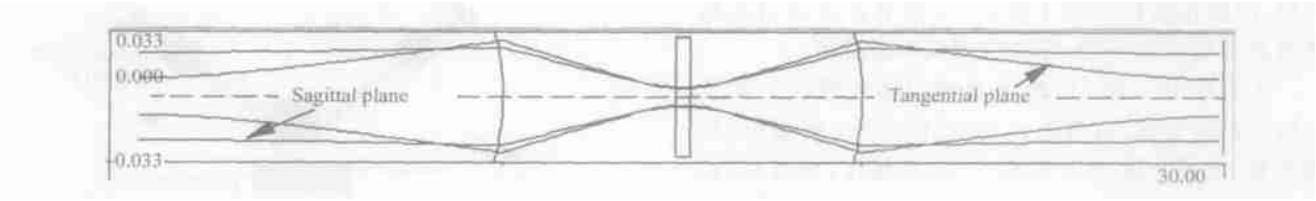


图 2　R = 80 mm 时腔内高斯光束传输分布

Fig. 2　Propagation of the Gaussian beam through the ring path when R = 80 mm

(x-axis :propagation distance/ cm; y-axis :beam radius/ cm)

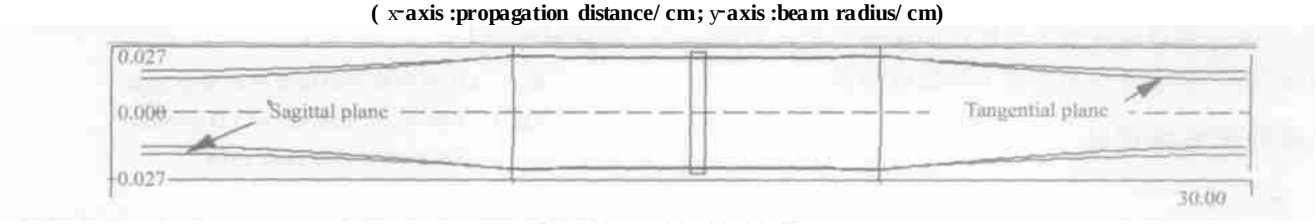


图 3　R = 300 mm 时腔内高斯光束传输分布

Fig. 3　Propagation of the Gaussian beam through the ring path when R = 300 mm

(x-axis :propagation distance/ cm; y-axis :beam radius/ cm)

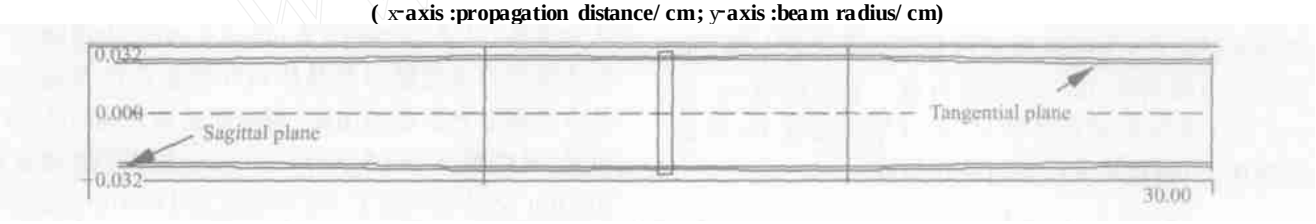


图 4　R = 1 000 mm 时腔内高斯光束传输分布

Fig. 4　Propagation of the Gaussian beam through the ring path when R = 1 000 mm

(x-axis :propagation distance/ cm; y-axis :beam radius/ cm)

表 1　R = 1 000 mm 时腔内元件上光束参数

Tab. 1　Beam parameter above cavity elements when R = 1 000 mm

(mm)

Element	Waist (T)	Waist (S)	Radius (T)	Radius (S)	Rayleigh length Z_R
Curved mirror 1	0.30	0.32	- 1452.0	- 1881.5	26.22
Laser media	0.30	0.32	68750.0	89794.0	26.22
Curved mirror 2	0.28	0.30	- 617.0	- 832.9	22.74
Flat mirror	0.28	0.30	- 3.9E+021	5.9E+021	22.74

Note : T, tangential plane ; S, sagittal plane

2.4　采用电光调制减少陀螺仪的闭锁效应

由信号发生器、驱动 $LiNbO_3$ 晶体的功率放大器组成电光调制电路,使用相位差 180°的正弦波调制信号分别调制对称放置的 2 块同等参数的电光晶体,产生偏频作用,减少锁区。工作过程为:电光晶体没有外电压时,折射率为 n。先在晶体 1、2 上加上一恒定电压 u_0,折射率变成 n_0;电压调制电压信号使用三角形波或者锯齿形波 $u(t)$,也加在电光调制晶体 1、2 上,其中电光调制晶体 1 为 $u(t)$,电光调制晶体 2 上为 - $u(t)$,即为相位相反的调制电压。当光束 ccw 到达电光晶体 1 时,调制电压加在电光晶体 1 上,由于电光效应,电光晶体的折射率将发生改变,变成 $n_0 + \Delta n$,折射率变化为

$$\Delta n = \left(-\frac{1}{2} n_0 r_{13}\right) u(t) \quad (4)$$

式中,r_{13}为电光导数。光束 ccw 的光程也将发生变化 $l\Delta n$,光束 ccw 一部分经过平面镜输出,一部分继续行进,经过电光晶体 2。由于时间极短,此时电光晶体 2 上的调制电压为 - $u(t)$。电光晶体的折射率为

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$n_0 - \Delta n$,光束 ccw 光程变化量 $-l\Delta n$,回到了初始相位;相似地,光束 cw 也发生同样变化,不同的是光束 cw 经过平面镜输出的那部分光束光程改变量为 $-l\Delta n$,光束 ccw 经过平面镜输出的那部分光束光程改变量为 $l\Delta n$,相当于环形腔有一个初始转速 Ω_0

$$\Omega_0(t) = \frac{n_0 l r_{13}}{2c} u(t) \tag{5}$$

式中:l 为晶体厚度;c 为真空中的光速。从而产生电光抖动效应。为减少损耗,$LiNbO_3$ 晶体的端面镀有对波长 1 064 nm 反射率不高于 0.2 %高透膜。

2.5　系统工作过程

该侧泵陀螺仪工作原理为:如图 1 所示,由 LD 阵列发出的泵浦光 $\lambda_1 = 808$ nm,经过聚焦耦合透镜,准直聚焦到晶体增益;环形腔内形成双向行波振荡;经 F-P 标准具选模,实现单纵模运转;双向输出经平面镜输出;经过分束板、棱镜,在读出电路上产生干涉,可以获得双向光波的拍频信号;电光调制晶体 1、2 产生电光抖动,减少陀螺仪的闭锁效应。

半导体致冷片装在散热片上,用导热硅胶将 LD 列阵贴在半导体致冷片上散热,在 LD 列阵基底内部放置热敏电阻,作为反馈温度传感器,温控电路驱动半导体致冷片,使 LD 列阵 4 在恒定温度下工作,防止了泵浦波长的漂移,有利于获得环形激光器的稳定输出。

3　响应特性

环形腔采用正三角形,典型的周长 $L = 30$ cm,$A = 43$ cm^2,$\lambda = 1.064$ μm,分析激光陀螺方案的响应特性[6]。

1) 标度因数

$$k = \frac{\lambda L}{4A} = 3.8[(°)/(\mathrm{h}\cdot\mathrm{Hz})] \tag{6}$$

2) 灵敏度

$$\Omega_{\min} = \frac{\lambda L}{4A}\Delta\nu_{纵模} \tag{7}$$

其中,瞬时线宽 $\Delta\nu = 2\pi(\Delta\nu_C)^2 h\nu / P_0$,$\Delta\nu_C$ 为环形腔空腔谐振线宽,P_0 为环形腔输出功率,依赖具体环形腔的参数。对于固定激光器来说,$\Delta\nu_{纵模}$ 往往比 He-Ne 气体陀螺仪大很多,必须采取稳频技术,腔体采用低膨胀系数材料,提高反射镜镀膜质量来压窄 $\Delta\nu_{纵模}$ 线宽。压窄激光器线宽,是固体环形激光器用于陀螺仪的关键。

3) 陀螺的精度极限

$$\Delta\Omega = \frac{\lambda L}{4A}(\Delta\nu/\pi\tau)^{1/2} \tag{8}$$

其中,τ 为测量时的取样平均时间。

4) 动态范围

$$\Omega_{\max} = \frac{\lambda L}{4A}\Delta\nu_g \tag{9}$$

其中,$\Delta\nu_g$ 为激光器谱线增益有效宽度。增益介质 $Nd:YVO_4$ 具有比 He-Ne 气体宽的增益曲线,则动态范围陀螺比 He-Ne 气体陀螺仪大。

此方案的优点是 LD 阵列于侧面泵浦,安装在环形腔的内侧或者安装于垂直于腔平面的位置,便于实现陀螺仪的小型化,同时结构和气体激光陀螺仪相似,可充分利用气体激光陀螺仪的现成工艺;采用侧泵方式,增益介质受光面能量比较均匀,能较好地克服热应力问题;使用两端面按布氏角切成的晶体,抑制晶体内驻波振荡以及减少由晶体表面散射引起的闭锁;同时环形腔为三角形腔,没有负面积;采用电光晶体进行电光调制,起到机械抖动相似的效果,减少陀螺仪锁区,但抖动频率却能远高于机械抖动;读出电路如采用细分电路,能提高陀螺仪测量精度。

4　结　论

1) 该方案采用侧面泵浦,能较好地克服热应力问题;

2) 环形腔采用等边三角形;稳定性条件为采用大曲率($R = 1\,000$ mm)曲面镜;腔体没有负面积,可利用气体激光陀螺仪的现成工艺;

3) 使用晶体增益,可实现全固态激光陀螺;为抑制由于晶体端面垂直光轴引起晶体内驻波振荡,减少由晶体表面散射引起的闭锁,两端面按布氏角(62.94°)切成;

4) 采用电光晶体进行电光调制,起到机械抖动相似的效果,但抖动频率却能远高于机械抖动;

5) 动态范围,陀螺比 He-Ne 气体陀螺仪大。

参考文献:

[1] WU Xiao-ming, GAO Feng, TIAN Wei, et al. Experimental investigation on re-entrant integrated optic gyros[J]. Journal of Opto-electronics ·Laser (光电子·激光), 2001, **12** (7): 679-682. (in Chinese)

[2] Halldorsson, et al. Diode-pumped solid-state ring laser gyroscope[P]. United States Patent: 5960022, 1999-09-28.

[3] Jean-Claude M Diels, Dietrich Kuehlke, Jason Jones, et al. Progress toward a compact solid state active laser gyroscope[A]. In: Proc SPIE[C]. 1999, **3616**: 136-142.

[4] Chow W W, Gea-Banaciloche, Pedrotti L M, et al. The ring laser gyro[J]. Rev Mod Phys, 1985, **57**(1): 61-103.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社, 1985.
[6] 杨培根,龚智炳,等. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.

作者简介:
万顺平 (1974 -),男,博士研究生,江西南昌人,研究领域为固体激光工程和机械电子工程.

(上接第 1314 页)

[3] Cox I J, Sheppard C J R, Wilson T. Reappraisal of arrays of concentric annuli as superresolving filters[J]. J Opt Soc Am, 1982, **72**(9): 1287-1291.
[4] Sheppard C J R, Gu Min. Improvement of axial resolution in confocal microscopy using an annular pupil[J]. Optics Communications, 1991, **84**: 7-13.
[5] Deng Xiao-qiang, Wang Gui-ying, Xu Zhi-zhan. 3-D super-resolution pupil filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, **28**(5): 459-462. (in Chinese)
[6] Born Max, Wolf Emil. Elements of the Theory of Diffraction[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 412-516.
[7] Sheppard C J R, Hegedus Z S. Axial behavior of pupil-plane filters[J]. J Opt Soc Am A, 1988, **5**(5): 643-647.
[8] Martinez-Corral Manuel, Andres Pedro, Zapata-Rodriguez Carlos J, et al. Three-dimensional superrsolution by annular binary filters[J]. Optics Communications, 1999, **165**: 267-278.
[9] Sheppard C J R, Gu M. Optical sectioning in confocal microscopes with annular pupil[J]. Optik, 1991, **86**(5): 169-172.
[10] Wang Haifeng, Gan Fuxi, Chen Zhongyu. A new superresolution element[J]. Acta Optica Sinica, 2001, **21**(5): 593-596. (in Chinese)

作者简介:
丁洪萍 (1976 -),女,安徽滁州人,硕士,主要从事光学超分辨率的研究.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net