

全反射棱镜式环形激光器合光输出及陀螺精度特性分析

刘健宁^{1,2} 蒋军彪² 石顺祥¹ 钟 聪²

(¹西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

(²西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111)

摘要 在全反射棱镜式激光陀螺中, 环形激光器的合光输出特性直接影响激光陀螺的工作精度。利用激光器的模式理论, 研究了在不同转速下, 合光棱镜处的顺、逆时针光束干涉光场分布, 分析了因光阑和合光棱镜加工、装配不当等因素造成的 y 方向合光角过大, 高阶横模引起的干涉条纹歧化, 以及多纵模对干涉光场分布的影响。实验研究了合光棱镜特性对激光陀螺测角精度的影响。

关键词 相干光学; 环形激光器; 合光棱镜; 干涉图

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0102002

Analysis of Total Reflection Prism Ring Laser's Output Characteristic and Gyroscope's Accuracy

Liu Jianning^{1,2} Jiang Junbiao² Shi Shunxiang¹ Zhong Cong²

(¹ School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

(² Xi'an North JIERUI Opto-Electronics Technology Ltd., Xi'an, Shaanxi 710111, China)

Abstract In total reflection prism laser gyro, the combiner output characteristics directly affect the gyroscope's accuracy. By using the laser mode theory, the combination spot patterns of clockwise and anti-clockwise beams in different rotation speeds are analyzed. The interference spot abnormalities caused by unsuitably assembled diaphragm or combining prism, passed higher-order transverse mode, too big y direction angle, as well as multi-longitudinal modes are discussed. The relationship between beam combination quality and navigation accuracy in ring laser is studied experimentally.

Key words coherence optics; ring laser; combining prism; interferogram

OCIS codes 140.3370; 140.3430; 230.5480

1 引言

全反射棱镜式激光陀螺(TRPLG)^[1,2]是一种以全反射棱镜式环形激光器^[2~10]为核心器件的高精度测角速度传感器。与目前常见的反射镜式环形激光器不同^[11,12],全反射棱镜式环形激光器(TRPRL)直接采用合光棱镜获取输出光,这种合光棱镜不需要镀膜,本身具备光阑的作用,能够减少光阑数量、降低装配难度。但是在实际工作中,合光棱镜加工、

装配不当等因素会直接影响激光陀螺的工作精度。本文从理论和实验上研究了 TRPRL 腔内的模式特性、合光棱镜处顺、逆时针光束的干涉光场分布,分析了合光输出特性对激光陀螺测角精度的影响。

2 合光棱镜耦合原理概述

TRPLG 全反射棱镜和光路如图 1 所示。合光棱镜装配在全反射棱镜 4 的全反射工作面上,环形

收稿日期: 2012-07-19; 收到修改稿日期: 2012-09-25

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFR70370)资助课题。

作者简介: 刘健宁(1985—),男,博士研究生,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: liu.j.n._@163.com

导师简介: 蒋军彪(1962—),男,高级工程师,博士生导师,主要从事惯性技术方面的研究。

E-mail: jrcompany@163.com

激光器腔内光斑直径为 1.5 mm。为保证环形激光器在基横模(TEM_{00q})振荡,通常使用矩形外光阑,且以与全反射棱镜直接接触的方式安装在相应棱镜表面上。

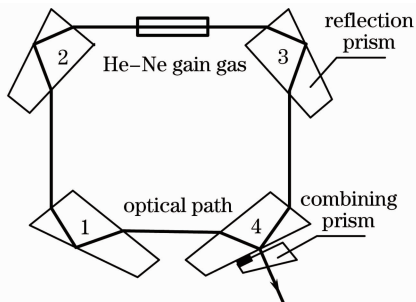


图 1 环形激光器光路图

Fig. 1 Ring laser's optical path

合光棱镜输出原理如图 2 所示,其中 A 面为耦合面,B 面为合光面,C 面是光胶面,A 面和 B 面的夹角称为合光棱夹角 β 。合光棱镜输入面靠近全反射棱镜 4 的全反射面放置,且保证两块棱镜的工作面间有波长量级的间隙。这样,当环形激光器腔内光束由棱镜全反射时,通过间隙空气层中的倏逝波^[7]可将光能量耦合出谐振腔,耦合输出的多少由间隙层厚度决定。由图可见,环形激光腔的两反向行波将由合光棱镜合并输出,合光棱夹角 β 与合光后两束光夹角一半 θ 的关系为

$$\beta = 90^\circ \pm \theta. \quad (1)$$

当合光棱夹角为 $\beta = 89^\circ 59' 59''$ 或 $\beta = 90^\circ 1''$ 时,合光后两束光的夹角为 $2''$,半角 $\theta = 1''$ 。显然,合光棱夹角唯一地决定了合光后两束光的夹角,也直接通过两输出光的干涉效应影响了激光陀螺的工作精度。该合光棱镜的尖棱结构,也使其具备了光阑的作用。

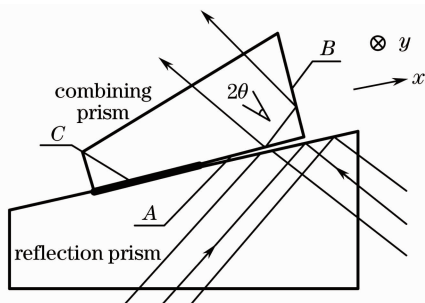


图 2 合光棱镜工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of combining prism

3 合光输出特性分析

为了研究陀螺的工作特性,必须清楚陀螺中顺、逆时针两束光的特性,为此利用模式理论研究干涉场的分布。通常的 TRPRL 均采用全反射棱镜表面光胶矩形外光阑实现横模^[13]选择,其通光区近似为正方形,如图 3 所示。图 3 坐标轴与图 2 对应, x 方向在激光陀螺光路平面内, y 方向垂直于激光陀螺光路平面。环形激光器腔内反向行波振幅分布各自满足厄米-高斯近似,可以表示为

$$E_{nm}(x, y) = C_m H_m\left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}}x\right) \cdot H_n\left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}}y\right) \times \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{L\lambda/\pi}\right), \quad (2)$$

式中 C_m, C_n 为常数; $H_m(X)$ 为 m 阶厄米多项式:

$$H_m(X) = (-1)^m \exp(X^2) \frac{d^m}{dX^m} \exp(-X^2) = \sum_{k=0}^{[m/2]} \frac{(-1)^k m!}{k!(m-2k)!} (2X)^{m-2k}, m = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

式中 $[m/2]$ 表示 $m/2$ 的整数部分。在基模状态下, $m = n = 0$,厄米多项式 $H_0(X) = 1$, 振幅分布为

$$E_{00}(x, y) = C_{00} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{L\lambda/\pi}\right). \quad (4)$$

在高阶模状态下, m, n 取一系列不为 0 的整数,代入对应的厄米多项式,可得高阶横模振幅分布,以 TEM₀₁ 模为例,其振幅分布为

$$E_{01}(x, y) = C_{01} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{L\lambda/\pi}} y \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sqrt{L\lambda/\pi}}\right). \quad (5)$$

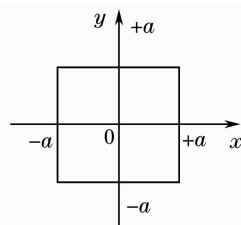


图 3 环形腔通光区域示意图

Fig. 3 Light passing region of the ring cavity

当顺时针(CW)和逆时针(CCW)光同时照射到光电探测器光敏面上且两束光等振幅,即 $E_{CW} = E_{CCW} = E_0, I_{CW} = I_{CCW} = I_0 = \alpha E_0^2/2$ 时,在光电接收器响应时间 τ 内的平均合成光强为

$$I(\mathbf{r}, t) = \alpha \langle (E_{CW} + E_{CCW})^2 \rangle = \frac{\alpha}{\tau} \int_0^\tau (E_{CW} + E_{CCW})^2 dt = \frac{\alpha E_0^2}{\tau} \int_0^\tau (\cos \phi_{CW} + \cos \phi_{CCW})^2 dt =$$

$$\frac{\alpha E_0^2}{\tau} \int_0^{\tau} \left[1 + \frac{1}{2} (\cos 2\phi_{CW} + \cos 2\phi_{CCW}) + \cos(\phi_{CW} + \phi_{CCW}) + \cos(\phi_{CW} - \phi_{CCW}) \right] dt, \quad (6)$$

式中 $\phi_{CW}(\mathbf{r}, t) = (2\pi\nu_{CW}t - \mathbf{k}_{CW} \cdot \mathbf{r})$; $\phi_{CCW}(\mathbf{r}, t) = (2\pi\nu_{CCW}t - \mathbf{k}_{CCW} \cdot \mathbf{r})$; α 为常系数, 光频率大约为 10^{14} Hz, 实际光敏元件的响应时间 τ 远大于光频率变化周期, 即 $\tau \gg 1/(2\nu_{CW})$, $\tau \gg 1/(2\nu_{CCW})$, $\tau \gg 1/(\nu_{CW} + \nu_{CCW})$ 。所以(6)式中前两项在较长的 τ 时间段内积分为 0, 最后一项为

$$\cos(\phi_{CW} - \phi_{CCW}) = \cos[2\pi\Delta\nu t - 4\pi\theta(x+y)/\lambda], \quad (7)$$

这里频差 $\Delta\nu = \nu_{CW} - \nu_{CCW}$, 若 $\Delta\nu = 0$, 即陀螺处在无角速度输入状态, $I(x, y) = 4I_0 \cos[2\pi\theta(x+y)/\lambda]$, 此时光电探测器光敏面上是稳定不变的等间距干涉条纹, 条纹间隔为 $\Delta x = \lambda/(2\theta)$ 。若 $\Delta\nu \neq 0$, 表示环形激光器转动, 使顺、逆时针两束光间产生拍频, 光强分布在瞬时仍然是等间隔干涉条纹。但随着时间 t 变化, 干涉条纹将整体平移。将激光器谐振腔合光棱镜处正、反向光束振幅分别代入(6)式中, 得到

$$I(x, y, t) = \frac{\alpha E_0^2}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ 1 + \cos \left[2\pi\Delta\nu t - \frac{4\pi\theta(x+y)}{\lambda} \right] \right\} dt. \quad (8)$$

将基模振幅(4)式及高阶横模振幅(5)式分别代入(8)式, 计算得到每个横模在光斑范围内的光强分布, 将它们相加后即得到多横模混合状态下的光强分布。(8)式中, x, y 分别为与两光束夹角平分线相垂直、平行方向的坐标值, 合光角 θ 单位为弧度。

将一只双板光电探测器的光敏面放置在垂直于合光光斑角平分线的位置, 只考虑 x 轴方向上的光斑情况, 设 $y=0$ 。当陀螺转动时, 光电探测器检测出与(8)式光强变化相同的电信号

$$i_{(x)} = i_0 \cos \left(2\pi\Delta\nu t - \frac{4\pi x\theta}{\lambda} \right). \quad (9)$$

设双板光电探测器的两个光敏元 A, B 的间距为 l , 则光电探测器上将获得两列频率为 $\Delta\nu$, 相位差约为

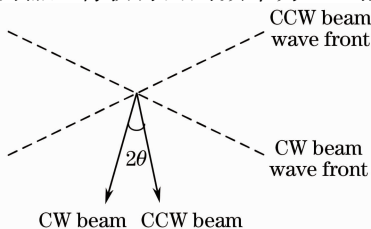


图4 合光角 θ 示意图

Fig. 4 Angle of light combination

$\frac{4\pi\theta l}{\lambda}$ 的正弦电信号。鉴相电路依据正弦电信号的相位取值, 可以判断出陀螺的转动方向。

根据高斯激光光束的特性, 激光束横断面椭圆光斑长、短轴都较小, 合光后的干涉区也很小, 陀螺为了判向, 要求干涉区内条纹间距 Δx 与光斑横断面椭圆长、短轴相当。条纹间距取值应为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\theta} = 2n \cdot \max(\omega_m, \omega_s), \quad (10)$$

式中 n 为全反射棱镜的折射率, ω_m, ω_s 分别为合光棱镜处于子午面、弧矢面的高斯光斑半径。将(10)式代入(1)式, 得到合光棱镜合光棱夹角取值, 应为

$$\beta = 90^\circ \pm \frac{45\lambda}{\pi n \cdot \max(\omega_m, \omega_s)}. \quad (11)$$

可见(1)式将激光谐振腔内的顺、逆时针光束理想化为两点, (11)式则考虑了顺、逆时针高斯光束半径对合光棱夹角 β 的影响, 如果顺、逆时针光束半径相等, (11)式简化为(1)式; 如果不相等, 例如合光棱镜装配位置不在陀螺对称轴上, 则合光棱镜设计上需要考虑光束半径的影响。所以耦合光束质量反过来决定了合光棱镜的具体设计, 合光光斑的条纹间距决定了光电探测器双光窗间距。

4 模拟仿真与实验对比

4.1 理想合光工作状态

假设环形激光器处在理想合光状态, 即两光束严格合成在同一方向, y 方向合光角为 0, 并假设陀螺转速为 0, 根据(8)式计算得到的 TEM_{00q} 基模干涉光强度分布图如图 5 所示。干涉光斑在中央 $x=0$ 处出现沿 y 方向的暗条纹, 暗纹在 x 方向上宽度约为 0.12 mm。图 6 上半部分是用 CCD 在与合光输出光束垂直的平面上检测到的合光光斑图, 沿 y (竖直) 方向为暗纹, 与模拟结果基本吻合。实测合光光斑中有长尾迹是因为腔中(合光棱镜)矩形光阑短边靠近腔中心轴, 其棱边产生的衍射效应造成的, 该方向的衍射不影响激光陀螺的正常测量工作。实际的激光陀螺是根据上述干涉光斑暗条纹间距 Δx , 选用两光窗间距为 $\Delta x/4$ 的双光电探测器, 探测移动的暗条纹数来测量角速度。图 6 下半部分是处于理想合光状态的激光陀螺的角速度测量精度曲线: 测试过程是感测 8.45°/h 的地球自转角速度分量

(可以认为匀速),测试时间为 2 h,单位时间内光电探测器表面扫过 710 条暗条纹,条纹计数统计基本上呈现为一条直线,波动范围 ± 1 条条纹,相应的角速度测量精度优于 $0.01^\circ/\text{h}$,满足惯性级导航要求。

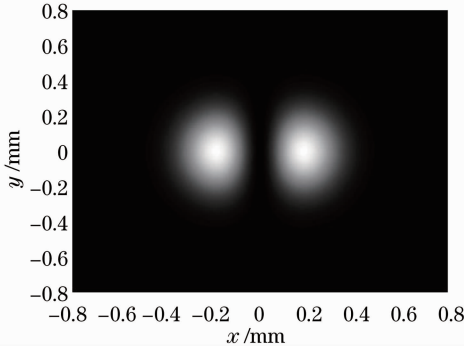


图 5 TEM_{00q} 模干涉光斑图

Fig. 5 Interferogram of TEM_{00q} mode

根据激光陀螺的双光电探测器工作原理,利用移动的暗条纹得到相位差 $\pi/2$ 的正、余弦信号,再通过信号处理,可以辨别条纹移动的方向^[3]。特别是,正、余弦信号又是稳频电路的反馈控制信号,所以干涉暗条纹的质量非常关键。如因光阑和合光棱镜加工、装配等原因导致暗条纹倾斜、边缘模糊、难分辨,则由光电探测器两光窗所获正、余弦信号将畸变,并将影响稳频质量,从而影响角速度测量精度。

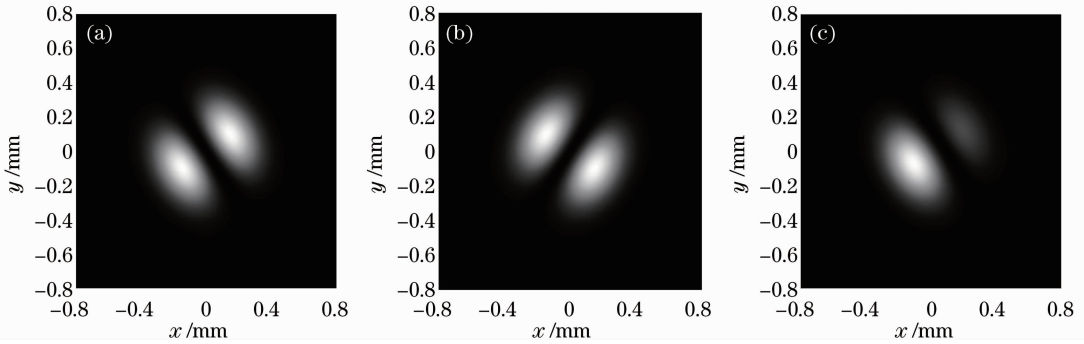


图 7 合光棱镜倾斜基模干涉光斑图。(a)右倾 $30'$,陀螺静止;(b)左倾 $30'$,陀螺静止;(c)右倾 $30'$,陀螺转动

Fig. 7 Fundamental mode interferograms with the combining prism tilted. (a) Tilted $30'$ to the light, gyro still;

(b) tilted $30'$ to the left, gyro still; (c) tilted $30'$ to the light, gyro rotation

图 8 是 CCD 实测环形谐振腔倾斜光斑图及对应的系统测试精度曲线。图中曲线零偏稳定性差,条纹计数在测试过程中波动较大,波动范围为 728~740 个脉冲。当干涉条纹发生倾斜时,陀螺稳频、稳腔长控制受到影响,这是造成在外界相同输入角速度条件下陀螺精度曲线异常波动的主要原因。这部分陀螺一般在整个测试过程中精度比较差,但并未丧失测角速度功能。干涉条纹倾斜的主要原因是

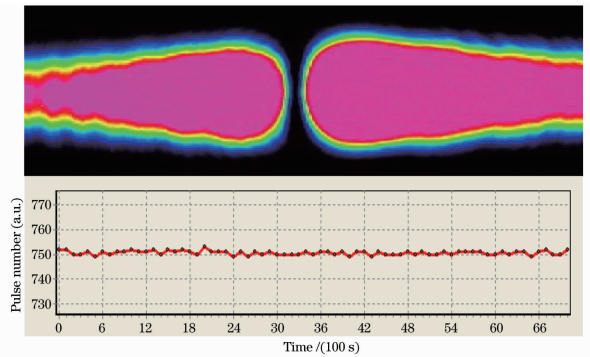


图 6 CCD 检测的正常光斑与测试精度图

Fig. 6 Qualified fringe detected by CCD and test accuracy of gyroscope

4.2 合光棱镜倾斜对陀螺工作特性的影响

图 7(a),(b)分别为对应合光棱镜 y 方向右倾和左倾的 TEM_{00q} 模干涉光斑图。合光棱镜的合光棱在 y 方向小角度倾斜,造成顺、逆时针光束在合光面上无法完全交叠,相干系数减小,干涉条纹的能量分布受到影响,表现出暗纹垂直度降低。倾斜的条纹首先影响环形激光器稳频质量,其次造成光电探测器计数困难,影响陀螺精度。图 7(c)为合光棱镜右倾 $30'$,环形激光器转速 $8.45^\circ/\text{h}$,某瞬时 TEM_{00q} 模暗条纹产生移动的干涉光斑图。模拟分析表明,当合光棱镜在 y 方向上倾斜 $30'$ 以上时,合光光斑中的暗条纹就会出现较大倾斜。

顺、逆时针光束到达探测器表面时 y 方向合光角过大,引起附加相位差。造成这种故障的原因一般是合光棱镜加工或装配的问题,也有少部分是激光器老化的问题。

4.3 多模工作对陀螺工作特性的影响

图 9(a)为模拟多横模状态(TEM_{00q} 模与 TEM_{01q} 模共存)所形成的干涉光斑图样,由于光阑的限制作用,一般在实际中基模强度远大于高阶模,

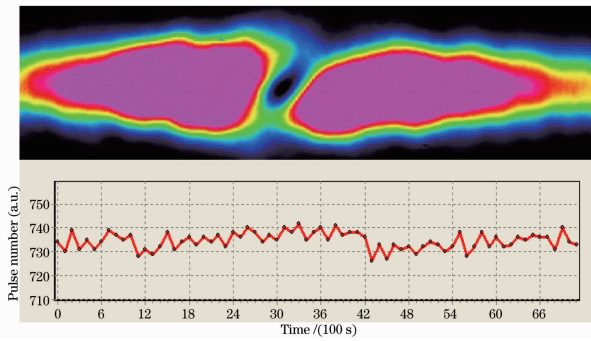


图 8 倾斜光斑精度曲线图

Fig. 8 Tilted interferogram and accuracy

所以模拟时侧重 TEM_{00q} 模式。图 9(c) 为实际生产中 CCD 截取的故障腔体干涉条纹图, 与模拟分析符合得很好。分析该模式状态是光阑限制横模不够, 高阶模起振并混合造成的。图 9(b) 模拟了陀螺转

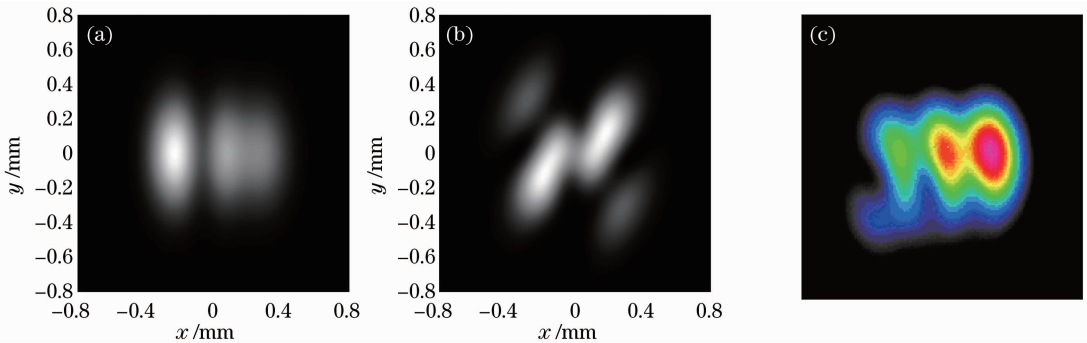


图 9 TEM_{00q} 模与 TEM_{01q} 模混合干涉光斑图。(a) 合光棱镜不倾斜, 陀螺静止; (b) 左倾 $90'$, 陀螺转动; (c) CCD 实测多横模合光光斑

Fig. 9 Mode TEM_{00q} and mode TEM_{01q} mixed interferograms. (a) The combiner is not tilted, gyro still; (b) tilted $90'$ to the left, gyro still; (c) multiple transverse modes interferogram detected by CCD

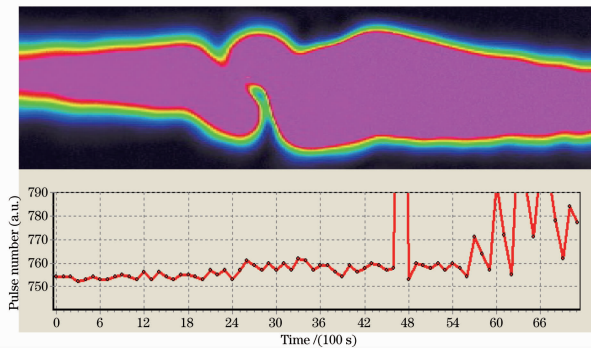


图 10 多横模光斑精度曲线图

Fig. 10 Multi-transverse modes interferogram and accuracy

4.4 多(双)纵模工作对陀螺工作特性的影响

理论上, 激光器各纵模间由于频率间隔大, 不会产生干涉现象。实际中, TEM_{00q} 模的顺、逆时针光束与 TEM_{00q+1} 顺、逆时针光束可以分别各自干涉, 获得的干涉光斑再叠加影响总干涉光斑能量分布结

速 $8.45^\circ/h$, 合光棱镜 y 方向左倾 $90'$, TEM_{00q} 模与 TEM_{01q} 模混合的干涉光斑。

图 10 为实测多横模干涉光斑图及相应的测试精度曲线。该谐振腔在测试进行到第 45 个时间点时, 光阑失去了对高阶横模的抑制作用, 高阶横模漏过引起干涉条纹歧化, 此时干涉暗条纹模糊不清, 光电探测器容易采集不正确的信号, 精度曲线在第 45 个时间点后大幅度波动。该谐振腔测试过程前 45 个时间点精度稳定性好, 此时对应着如图 6 所示的正常光斑。后期光斑如图 8 所示变差, 说明该谐振腔限模器件的装配初始就处于单、多模工作状态的临界点, 光阑装配不合格, 为变温测试精度带来隐患。由多横模状态引起的陀螺故障一般是功能性的。

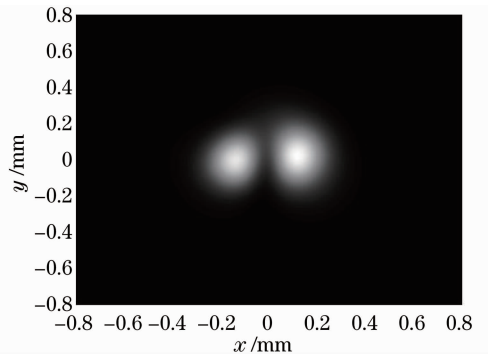


图 11 双纵模干涉光斑图

Fig. 11 Multi-longitudinal modes interferogram

果。图 12 是模拟双纵模状态干涉光斑图样, 与基横模、单纵模正常光斑相比较, 双纵模状态干涉光强较弱, 暗纹边界模糊。图 12 是实测双纵模状态的干涉光斑。由于谐振腔两纵模间存在频率间距不稳定的差拍, 造成干涉暗纹在一定范围内往复移动, 所以实测结果是一个无暗纹的亮斑。对应到仪表的测试精

度曲线,由于仪表在双纵模情况下条纹移动超出探测器响应时间,造成各控制回路的反馈控制信号紊乱,严重时诱发控制端死机,测试强制终止。如图12下半部分测试曲线所示,仪表测试进行到第40个测试点,为了获得双纵模状态,人为切断稳频伺服控制单元,到第48个测试点,控制端死机,无精度读数。由多纵模状态引起的陀螺故障一般是功能性的。

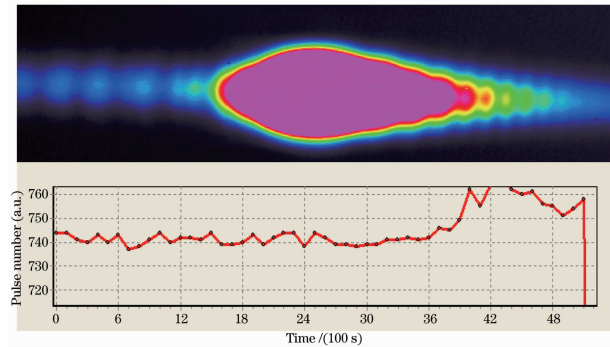


图12 双纵模光斑精度曲线图

Fig. 12 Multi-longitudinal modes interferogram and accuracy

5 结 论

利用激光器模式理论,研究了棱镜式环形激光器合光棱镜处的场结构,并进行了实验,得到如下结论:1) 棱镜式激光陀螺需要在单模状态下工作,为了获得单模状态,采用光阑和合光棱镜共同作用限模。光阑限模过“深”造成谐振腔损耗大,输出光斑模糊;光阑限模过“浅”造成谐振腔内多模式振荡,输出光斑条纹紊乱。2) 合光棱镜的装配质量对陀螺的精度特性有巨大影响。合光棱镜y方向存在装配误差时,会引起干涉条纹倾斜,造成稳频控制回路的非正常工作,影响陀螺精度。

参 考 文 献

1 Y. V. Bakin, G. N. Ziouzev, M. B. Lioudomirski. Laser Gyros with Total Reflection Prisms[M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003. 1~34

2 Zhao Dongyang, Shi Shunxiang, Jiang Junbiao *et al.*. Theoretical analysis of coupled output from ring laser with total reflection prisms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 652~655
赵东洋,石顺祥,蒋军彪等. 全反射棱镜式环形激光器耦合输出的理论分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 652~655

3 Gao Bolong, Li Shutang. Laser Gyro[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. 50~52
高伯龙,李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1984. 50~52

4 Jiang Yanan. Ring Laser Gyro [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. 214~216
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. 214~216

5 Sh. Mohammad-Nejad, M. Pourmahyabadi. The performance modeling of ring laser gyro in inertial navigation[C]. 13th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2006. 318~321

6 Jin Shilong, Long Xingwu, Wang Fei. Technology research for ring laser gyro to overcome the environmental temperature variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 409~414
金世龙,龙兴武,王飞. 激光陀螺克服高、低温冲击的技术研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 409~414

7 Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 48~50
石顺祥,张海兴,刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 48~50

8 A. Mathews, H. Wetter. Cost efficient high accuracy inertial navigation[J]. *Navigation*, 1989, **36**(4): 157~172

9 Zhang Mei. Angle random walk of ring laser gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208004
张梅. 激光陀螺的角度随机游走[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0208004

10 Zhan Dejun, Qin Shiqiao, Wang Xingshu. Precise measurement of rate biased laser gyro scale factor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1327~1331
战德军,秦石乔,王省书. 速率偏频激光陀螺标度因数高精度测量方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1327~1331

11 Fan Zhenfang, Luo Hui, Lu Guangfeng *et al.*. Theoretical research on lock-in error compensation for mechanical dithered ring laser gyro[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112006
樊振方,罗辉,卢广峰等. 机抖激光陀螺锁区补偿的理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112006

12 Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Research on Langmuir flow pattern in laser gyros[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0502015
汪之国,龙兴武,王飞. 激光陀螺中朗缪尔流形成的研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0502015

13 Shen Jinhua, Wang Shiyu, Guo Zhen. Nonlinear network of measuring transverse modes in a laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 555~558
沈金华,王石语,过振. 一种测量激光束横模结构的非线性网络[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 555~558

栏目编辑:何卓铭