

文章编号: 100221582(2005)0120044204

一种 LD 泵浦双向输出固体环形激光器^X

万顺平, 孙利群, 田芊, 章恩耀

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

摘 要: 提出了一种用于激光陀螺仪的 LD 泵浦 Nd:YVO₄ 双向输出固体环形激光器。计算了谐振腔的环绕矩阵, 分析了曲面镜焦距和放置距离对谐振腔稳定性的影响。得出了构成环形腔的稳定条件, 光腰最大化条件, 以及光束特性。并对所设计的环形腔进行了实验, 获得了双向、多纵模基横模连续输出。

关 键 词: 环绕矩阵; 稳区图; 二极管泵浦固体激光器; 环形激光器; 双向; 陀螺仪

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

LD pumped solid state ring laser with bidirectional outputs

WAN Shunping, SUN Liqun, TIAN Qian, ZHANG Enyao

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A diode pumped Nd:YVO₄ bidirectional solid state ring laser used for optical gyro is discussed. By exploiting ABCD transmission matrix theory, the influence on cavities' stability by the ROC and separation distance of curved mirrors and cavities' length is analyzed. Stability region of the cavity and maximum beam waist plot are shown as well as Gauss beam characteristics. In the experiment, the bidirectional, multi longitudinal and TEM₀₀ mode continuous wave outputs are obtained.

Key words: round matrix; stability region; diode pumped solid state laser; ring laser; bidirectional; gyro

1 引 言

陀螺仪是惯性导航及制导技术的关键部件,也是典型的光电系统。光学陀螺仪可分为两大类:谐振型和干涉型^[1]。前者的典型代表是基于 He-Ne 气体环形激光器的激光陀螺,它亦是目前广泛应用的导航级光学陀螺,但有着其固有的缺点,如闭锁效应,机械抖动引入的额外噪声,气体成分,气压稳定,寿命短等问题;光纤陀螺以干涉型为主,已取得重大进步并获得应用。但受各种关键器件、关键工艺等(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,且难于实现小型化。集成光波导陀螺仪研究已很深入,但也存在很多问题,其中器件问题是主要的。近年来人们提出固体环形激光陀螺仪(DPSSRLG)^[2~4],却有着如下显著优点:(1)采用 LD 作泵浦源,驱动电路比气体激光陀螺简单,能量转化效率高;(2)由于增益介质是固体,可以做成全固态陀螺仪,温度效应弱;(3)腔内很容易加入光学元件,采用锁模技术,可以工作于脉冲模式。经过合

理的谐振腔设计,腔中反向传播的两路光脉冲将不会在构成谐振腔的光学器件中相遇,因此,这两路光之间就失去了耦合媒介,从而根本上消除了“闭锁”赖以产生的根源。DPSSRLG 属有源谐振腔激光陀螺仪,和 He-Ne 陀螺一样可直接检测拍频信号。

本文提出一种用于陀螺仪的 LD 泵浦双向固体环形激光器方案,着重分析了环形激光器的谐振腔,理论上计算了谐振腔的环绕矩阵,得出了环形腔的稳定条件以及光束特性;并对所设计的环形激光器进行了实验研究。

2 LD 泵浦双向固体环形激光器方案

DPSSRLG 比传统光学陀螺仪具有高增益,全固化等优点,我们提出一种用于激光陀螺仪的双向连续波环形激光器方案,如图 1 所示。

本实验所用半导体激光器 GaAlAs / GaAs,功率 2W,峰值波长为 810 ± 5 nm,固定在散热片上,并用半导体制冷器冷却且可控温。增益介质采用吸收波长与 LD 峰值波长相匹配的晶体,我们选用技术成熟的 Nd:YVO₄,没有选用 Nd:YAG。与 Nd:YAG 相比,Nd:YVO₄ 热导率虽然比 YAG 低,机械

X 收稿日期: 2004202205; 收到修改稿日期: 2004204228

E-mail: wansp00@mails.tsinghua.edu.cn

基金项目: 清华大学基础研究基金(JC2001015)

作者简介: 万顺平(1972),男,江西南昌人,清华大学博士研究生,从事固体激光工程和机械电子工程研究。

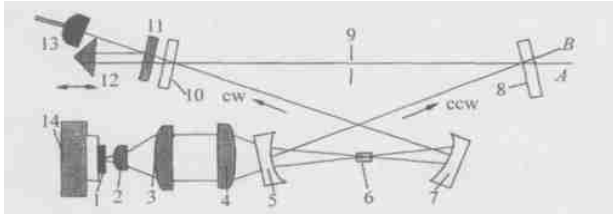


图 1 四镜 8 字形双向连续波环形激光器

12 激光二极管; 2, 3, 4 聚焦透镜; 5, 7 球面镜 M_5, M_6 ;
6 Nd:YVO₄; 8, 10 平面反射镜; 11 分束板;
12 合光棱镜; 13 激光功率计; 14 制冷器。

性能也不如 YAG, 但因对 808nm 抽运光的吸收系数大; 吸收系数对抽运光波长的细微变化不灵敏, 以及可直接产生偏振光振荡及输出等特点, 在瓦级功率范围内作为 LD 端面抽运增益介质而颇具吸引力。Nd:YVO₄ 晶体掺杂浓度 0.15%, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, 晶体的两个端面镀 808 nm 和 1106 μm 的双波长增透膜, 晶体侧面用铝箔包裹 (以达到良好的热接触) 置入铜块内, 外面用半导体制冷块冷却并可控温。M₅, M₇ 为曲率半径为 100mm 的平凹镜, M₅ 凹面镀 1106 μm 的全反膜和 0.1808 μm 增透膜; M₇ 凹面镀 1106 μm 和 0.1808 μm 的全反膜。M₈, M₁₀ 为平面镜作折叠镜, M₈ 对 1106 μm 高反。M₁₀ 为对 1106 μm 部分透过的输出耦合镜。12 为对 1106 μm 能全反的棱镜, 用于合光。11 为分束板, 对 1106 μm, $T = 50\%$, $R = 50\%$, 也用于合光。

工作原理: 由 LD 发出的泵浦光, 经过聚焦光学系统, 泵浦 Nd:YVO₄ 增益介质。谐振腔为四镜 8 字形环形腔。增益吸收泵浦光, 发出系列波长的荧光; 由于模式竞争和谐振腔选模, 波长为 1106 μm 的光波将在腔内振荡, 形成双向输出; 经过合光, 可以获得双向光波的干涉图样。

3 谐振腔环绕矩阵

激光谐振腔的设计一般通过 ABCD 传输矩阵设计计算机程序来进行数值计算。该方案的谐振腔为四镜 8 字形环形腔, 下面将计算谐振腔的环绕矩阵, 分析其稳定条件。设曲面镜 M₅, M₆ 之间的臂长为 L₁, 经过 M₅ 2M₈ 2M₁₀ 2M₇ 的臂长为 L₂, 晶体长度 t, 晶体右表面距离 M₇ 为 L₃, 则 M₅ 到晶体左表面距离为 L₁ 2L₃ 2t。

与光轴成较大角度的光线在谐振腔中不必要讨论, 仅分析旁轴光线在腔内的传播行为。球面镜对斜入射光束的反射特性在子午面和弧矢面是不同的。设球面镜曲率半径为 R, 入射角为 θ, 对应反射后的焦距分别为 $f_T = R \cos \theta / 2$, $f_S = R \sec \theta / 2$, f_T 、

f_S 分别表示子午面和弧矢面内的焦距。子午面为环形光路平面, 弧矢面为垂直于子午面, 且包含所讨论的光路的平面^[5]。由于子午面和弧矢面焦距不同, 反射矩阵也不同, 可分别分析。对应的传输矩阵可表示为

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $i = T, S$ 分别表示子午和弧矢面的传输矩阵。

3.1 环绕矩阵

图 2 为四镜 8 字形环形腔的等效透镜波导图。使用分离变量分析法, 应用上述的传播矩阵, 选取距离曲面镜 M₅ 为 z 的平面 RP 为参考面计算环绕矩阵 T, 则参考平面 RP 距离晶体左表面距为 L₁ 2L₃ 2t, 环形腔的总腔长为 L = L₁ + L₃。

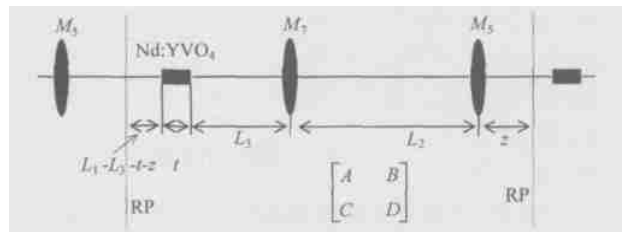


图 2 四镜 8 字形环形腔的等效透镜波导图

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_1 - L_3 - t - z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

则可以求得 ABCD 的表达式, 如式 (3) ~ (6) 所示。

$$A = \left(-\frac{2}{f_i} + \frac{1}{f_i^2 L_2} \right) z - \frac{1}{f_i L_2} + 1 \quad (3)$$

$$B = \left(\frac{2}{f_i} - \frac{L_2}{f_i^2} \right) z^2 + \left(-\frac{2t}{nf_i} + \frac{tL_2}{nf_i^2} - \frac{2L_1}{f_i} + \frac{2t}{f_i} + \frac{L_2 L_1}{f_i^2} - \frac{2L_1 t}{f_i^2} \right) z + \frac{t}{n} + L_2 + L_1 - t - \frac{L_2 L_1}{f_i} + \frac{tL_2}{f_i} - \frac{tL_2}{nf_i} = mz^2 + nz + B(0) \quad (4)$$

$$C = -\frac{2}{f_i} + \frac{1}{f_i^2 L_2} \quad (5)$$

$$D = \left(\frac{2}{f_i} + \frac{L_2}{f_i^2} \right) z + \frac{L_2 L_1}{f_i^2} - \frac{tL_2}{f_i^2} - \frac{2L_1}{f_i} + \frac{2t}{f_i} + \frac{tL_2}{nf_i^2} - \frac{L_2}{f_i} + 1 - \frac{2t}{nf_i} \quad (6)$$

当参考面的移动仅在 M₅ 和晶体之间的自由空间时, 矩阵元 C 为一个与 z 无关的常数, 物理上 C 表

示系统光焦度的负值。可以计算得光腰的大小 w_0 和对应的共焦参数 z_{05} 以及位置 z_5 [6]。

$$z_5 = -\frac{n}{2m} = \frac{1}{2n(t + nL_1 - tn)} \quad (7)$$

$$z_{05}^2 = -z_5^2 + \frac{B(0)}{m} = -\frac{1}{4} \times (-t + nt + 2nf_i - n \times L_1) \times \frac{2tnf_i - tn \times L_2 - 2tf_i + t \times L_2 - 2nf_iL_1 - 2nf_i \times L_2 + n \times L_2 \times L_1}{(2f_i - L_2)n^2} \quad (8)$$

$$z_{05}^2 = z_{05}/ \quad (9)$$

其中 n 为晶体的折射率; $n_o = 119573$; $n_e = 211652 @1064\text{nm}$; t 为晶体的长度; $t = 5\text{mm}$; $L_2 = 405\text{mm}$; 实验中可以选取 f 和 L_1 的值。

3.2 环形腔稳定性分析

由谐振腔稳定条件: 光腰平方为非负条件, 即共焦参数 $z_{05}^2 > 0$ 。由上述的环绕矩阵, 以 f 和

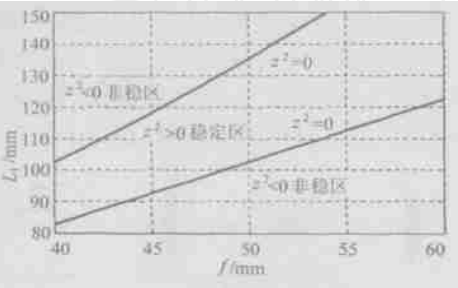


图 3 谐振腔稳区图

L_1 为变量, 可以分析谐振腔的稳定区域(子午面和弧矢面焦距 f 不同)。图 3 所示为谐振腔的稳区图, 实验时应在稳定区域内选择合适的曲面镜和放置位置。在稳定区域可以计算谐振腔光腰, 如图 4 所示光腰的分布。

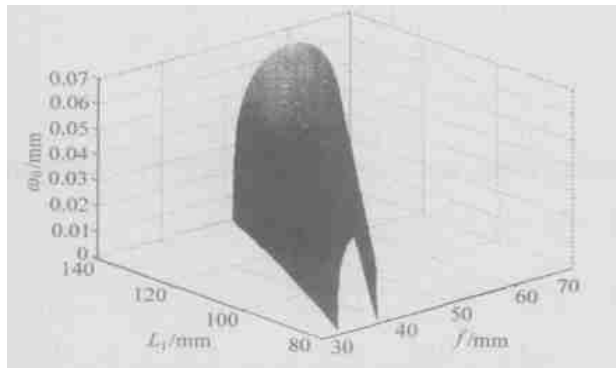


图 4 光腰随曲面镜焦距 f 和曲面镜间隔 L_1 变化的分布图

以上是以 f 和 L_1 为变量分析的。下面就本实验装置进行分析。实验装置中曲面镜的曲率半径选取了 100mm , 选取 $\theta = 6^\circ$ 为保证曲面镜的反射率, 反射角保持不变, 则子午面或弧矢面的焦距分别为: $f_i = \frac{R}{2} \cos \theta = 4917\text{mm}$, $f_s = \frac{R}{2} \sec \theta = 5013\text{mm}$ 。而两曲面镜的间距 L_1 是可以调整的。由于环形腔子午面以及弧矢面焦距不同, 其各自的稳定区也不同, 计算结果如图 5 所示。可见, 在弧矢面, 谐振腔

稳定条件是 L_1 在区间 $[10119 \quad 13412]$ 选取, 而在子午面, L_1 在区间 $[10311 \quad 13613]$ 谐振腔稳定, 所以稳定区域为 $L_1 = [10311 \quad 13412]$ 。当 $L_1 = 11414\text{mm}$ 时, 子午面和弧矢面具有相同的共焦参数, 光腰相等 ($w_0 = 01052\text{mm}$)。另外, 由式(10)和(11)可以计算 M_5 上的光斑、高斯光束等相面曲率半径和远场发散角 2θ 。

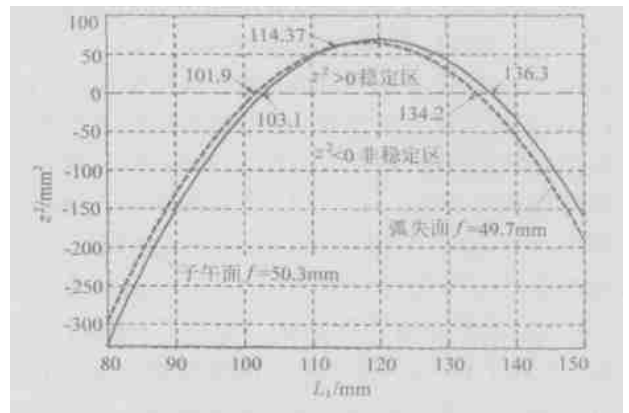


图 5 子午面焦距 $f = 4917\text{mm}$ 和弧矢面焦距 $f = 5013\text{mm}$ 时共焦参数曲线

在实验时取 $L_1 = 105\text{mm}$, 可以算得 $z_{0T} = 01040\text{mm}$, 对应的 Rayleigh 长度 $z_{RT} = \frac{z_{0T}^2}{w_0^2} = 4.7\text{mm}$, $z_{0S} = 0.036$, 对应的 Rayleigh 长度 $z_{RS} = \frac{z_{0S}^2}{w_0^2} = 3.8\text{mm}$; 腰斑距离 M_5 为 51125mm , M_5 上的高斯光束光斑 $w_5 = 0.436\text{mm}$, $w_{5s} = -51.69\text{mm}$, 远场发散角 $2\theta_s = 1.08^\circ$, $2\theta_T = 0.97^\circ$ 。腰斑大小和位置唯一决定了腔的高斯光束分布, 选取不同的参考平面 RP, 可以依次算出腔内光束分布。

谐振腔光腰大小的选择是提高激光器转换效率的关键之一, 通过选择 f 和 L_1 的值, 可以得到极大化光腰。图 6 为光腰极大化条件曲线和光腰位置曲线。

$$z_{05} = z_0 \sqrt{1 + (z_5/z_{05})^2} \quad (10)$$

$$z_5 = z_{05} (z_{05}/z_5 + z_5/z_{05}) \quad (11)$$

$$2\theta = 2\theta_0 \quad (12)$$

4 实验

根据上述的实验方案以及环形腔稳定性条件, 建立了实验装置, 如图 7 为双向输出的激光器装置图。由于 LD 波长随工作温度漂移 ($013\text{nm}/^\circ\text{C}$), 实

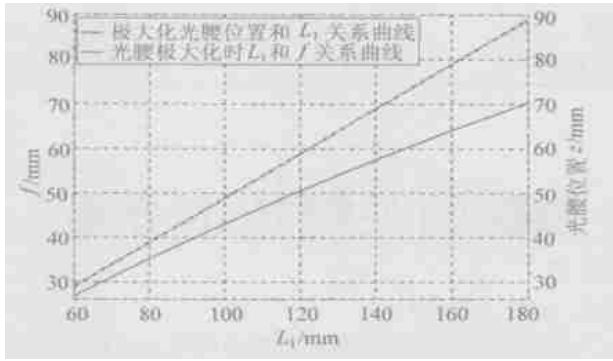


图 6 光腰极大化条件曲线和光腰位置曲线

实验中通过导热硅胶将 LD 固定在半导体制冷硅上,然后安装在铝散热块上。LD 的热沉处装有热敏电阻作为温度探测,并设计了温控系统,使得 LD 的工作稳定在 25℃,输出波长 80912nm。LD 最大功率 2W,对应的工作电流 218A。



图 7 DPSSL 实验装置
双向光束从平面镜 (M_8) 输出,
并在 CCD 上形成干涉条纹

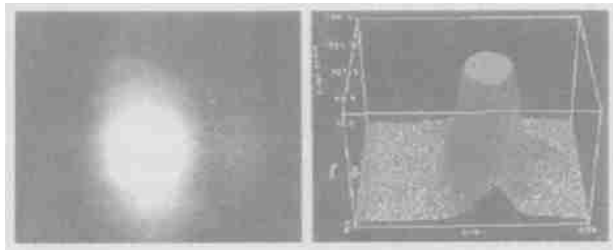


图 8 CCD 探测的 TEM_{00} 输出光斑以及
光斑截面相对强度分布

实验获得了双向、多纵模基横模连续输出,阈值为 014W,最大输出为 017 mW,光 - 光转化效率较低,这是由于泵浦光束经过物镜和聚焦透镜耦合进环形腔的结果,没有经过整形,泵浦光束和腔模交叠因子较小。

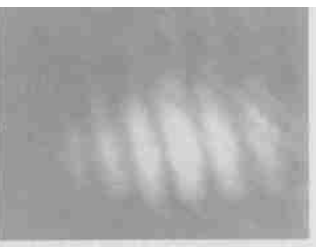


图 9 双向输出激光干涉图
泵浦功率为 0150W 时

图 8 为 CCD 探测的 TEM_{00} 输出光斑以及强度分布图,强度曲线峰值由于 CCD 饱和变得平坦。通过测量子午面的两个相距 $z_1 - z_2 = 46\text{mm}$, (z_1) = 01728mm, (z_2) = 1105mm,算得 $1.4 \times 10^{-2}\text{rad}$ 018°,和理论计算得出的 $2 \tau = 0.97$ 很接近。弧矢面同样可以测量。

双向输出的光束,经过图 1 所示的合光棱镜 12 以及分束板 11 进行干涉,图 9 为泵浦功率为 0150W 时的双向输出激光干涉图。实验对激光器的纵模进行了测试,如图 10 所示为多纵模。

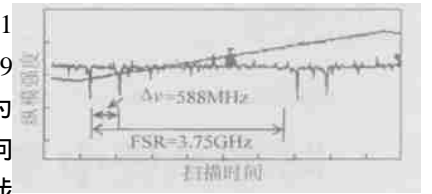


图 10 固体激光器纵模图

5 结 论

提出了具有四镜 8 字形腔的 LD 泵浦双向固体环形激光器,根据 ABCD 矩阵理论分析了稳定环形腔;计算了谐振腔的环绕矩阵,分析了曲面镜焦距和放置距离对谐振腔的影响,得出了构成环形腔的稳定条件、光腰极大化条件以及光束特性,分析结果对于四镜 8 字环形腔设计具有重要意义;并对所设计的环形腔进行了实验,获得了双向、多纵模基横模连续输出以及双向输出的干涉图。通过计算此类环形腔的结果,可以得出以下结论:

- (1) 四镜 8 字形腔环形腔的本征模式一般为椭圆高斯光束,只有曲面镜的曲率半径和放置位置位于一定区域,才能构成稳定腔;
- (2) 当曲面镜的曲率半径和放置位置满足一定条件,可以得到光腰极大值,从而获得发散角小的激光输出;
- (3) 当曲面镜的曲率半径和放置位置满足一定条件时(本实验中 L_1 为 11414mm),子午面和弧矢面的光腰半径相等,此时腔内本征模光腰处光斑为圆形,若使用带尾纤的 LD 泵浦,则能获得很好的模交叠因子;
- (4) 尽管 Nd:YVO₄ 增益为均匀加宽类型,但由于高增益以及在晶体内形成驻波,如果没有加纵模选模器件,此类环形腔易获得多纵模输出。

参考文献:

[1] 杨培根,龚智炳,等. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
 [2] Bohn M J, et al. Bidirectional Kerr-lens mode-locked femtosecond ring laser[J]. Optics Commun, 1997, 141: 53-58.
 [3] Dennis M L, et al. Analysis of a ring-laser gyroscope with intracavity phase-conjugate coupling [J]. Appl. Optics, 1994, 33 (9): 1659-1671.
 [4] 戴建明,等. 环形腔自锁模掺钛蓝宝石激光器[J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1056-1059.
 [5] 姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京:清华大学出版社,1985.
 [6] 吕百达. 激光光学, 第二版[M]. 成都:四川大学出版社, 1992.