

文章编号: 1672-8785(2022)02-0044-05

超大环形激光陀螺仪谐振腔参数研究

全秋叶¹ 郭文阁^{1,2*} 王 飞³ 徐学东¹
张立松² 高玉平² 张首刚²

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;
2. 中国科学院国家授时中心量子频标研究室, 陕西 西安 710600;
3. 湖南二零八先进科技有限公司, 湖南 长沙 410006)

摘 要: 大型激光陀螺是一种基于 Sagnac 效应的惯性传感器。随着尺寸的增加, 基模运转和增益成为重要参数。针对镜片匹配、放电电流大小及腔长等, 计算了 $ABCD$ 矩阵与高斯光束的特征参数, 验证了不同边长下环形谐振腔腰斑位置及放电电流对光阑的影响。实验结果表明, 出光阈值处光斑质量最优, 光斑最为平整, 比值接近于 1 且对称结构有利于高效读取信号。这对大型激光陀螺腔体设计具有一定的参考意义。

关键词: 激光陀螺; 谐振腔; 腰斑半径; 光学矩阵; 高斯光束

中图分类号: T-012 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.008

Research on the Parameters of the Resonant Cavity of the Super-large Ring Laser Gyroscope

QUAN Qiu-ye¹, GUO Wen-ge^{1,2*}, WANG Fei³, XU Xue-dong¹, ZHANG Li-song²,
GAO Yu-ping², ZHANG Shou-gang²

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Quantum Frequency Standard Laboratory, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China; 3. Hunan 208 Advanced Technology Co., Ltd., Changsha 410006, China)

Abstract: Large laser gyro is an inertial sensor based on Sagnac effect. As the size increases, the fundamental mode operation and gain become important parameters. Aiming at lens matching, discharge current size and cavity length, the characteristic parameters of $ABCD$ matrix and Gaussian beam are calculated, and the influence of the waist spot position of the ring cavity and the discharge current on the diaphragm under different side lengths are verified in this paper. The results show that the quality of the light spot at the light threshold is the best. At this time the light spot is the flattest, and the ratio is close to 1. The symmetrical structure is conducive to efficient signal reading. This has certain reference significance for the cavity design of large laser gyro.

Key words: laser gyroscope; resonant cavity; waist spot radius; optical matrix; Gaussian beam

收稿日期: 2021-11-09

作者简介: 全秋叶(1996-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要研究方向为光电子学。

*通讯作者: E-mail: wguo@xsyu.edu.cn

0 引言

自 20 世纪末投入使用以来, 激光陀螺仪因稳定性高、不受外界干扰的特性而多被应用于中、高精度军事领域。随着科学理论的不 断进步, 高灵敏度、高精度的需求推动激光陀螺迅速发展^[1-2]。近几年, 激光陀螺的性能随着结构的优化而提高。对传统激光陀螺而言, 由于光束路径的几何变化影响陀螺比例因子, 大型激光陀螺的腔体设计对稳定运转极为重要, 使得腔体结构成为重要的误差机制之一。而其中腰斑的位置和大小也决定谐振腔能否正常出光。越来越多的人把注意力放在腔体设计上。目前, 张熙、吕百达等人研究了“八”字环形谐振腔光束的传输特性, 并模拟仿真了镜片曲率对腔体参数的影响^[3-4]。但超大环形激光陀螺腔体参数仍是未解决的问题。因此, 研究谐振腔参数对于超大环形激光陀螺具有一定的参考意义。

本文依据 ABCD 传输矩阵及高斯光束特性, 计算了腰斑半径位置、大小等参数, 并将其与张熙等人的方案进行了对比。研究了超大环形激光陀螺正逆两束相向行波在腔内传输时改变腔长及电流大小对腰斑半径的影响, 并分析了光阑对整个腔体光斑模式选择问题。同时通过实验验证的方式对腔内光束进行分析和评价, 从而为设计陀螺腔体提供一定的参考信息。

1 理论分析

1.1 腔长变化引起腰斑大小变动的计算

本文设计的四镜环形谐振腔光路结构如图 1 所示。整套实验装置为外腔式, 其中每个镜片的曲率都是可变的。在其他因素不变的条件下, 选择镜片曲率 M_1 、 M_2 、 M_3 均为 8 m, M_4 为 ∞ 。 Z_{0i} 为臂上腰斑半径参考位置, L 为腔长, 本文设定 L 为 0.7 m、0.9 m、1.1 m 和 1.3 m。在洁净度为十级的实验室环境下, 假设空气损耗为 0, 光路由 M_1 开始, 依次经过 M_2 、 M_3 和 M_4 , 最后回到 M_1 。

直腔共轴球面腔的稳定性条件如下:

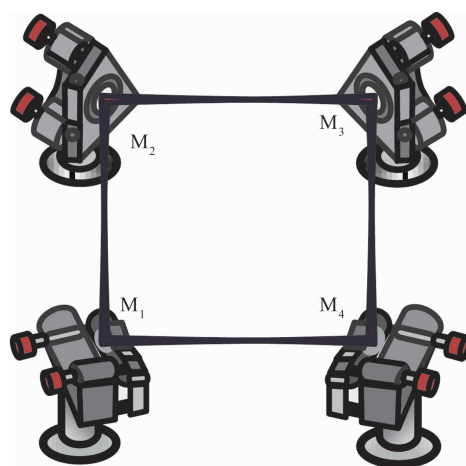


图 1 四镜环形谐振腔的示意图

$$-1 < \frac{1}{2}(A+D) < 1 \quad (1)$$

式(1)对于本文的复杂开腔同样适用。透镜焦距等于物光束在透镜处等相位面半径的一半时, 即可实现自再现变换。当前一个稳定腔发生的 $T=LR$ 单模高斯光束注入到下一个稳定腔中时, 如果第二个腔中能激发同样的模式, 那么它们就是匹配的。若前后腔的模式不匹配, 则容易发生模式交叉激发^[5-6]。分别取 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 为参考面, 将环形腔展开为等价的直腔, 即可求得腰斑半径所在位置及大小。例如, 以 M_1 为参考面, 正向(即图 1 中依次经过 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 的方向)行波等效周期性薄透镜序列如图 2 所示。

可求出相应环绕矩阵:

$$T = LRLRLRLR \quad (2)$$

光在空气中行进 x 距离的传播矩阵为

$$L(x) = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

光经过球面反射镜的变换矩阵为

$$R(f) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

可求出环形腔传输矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可依据稳定性判据来判断该结构腔体是否稳定, 并求出分臂上的腰斑半径:

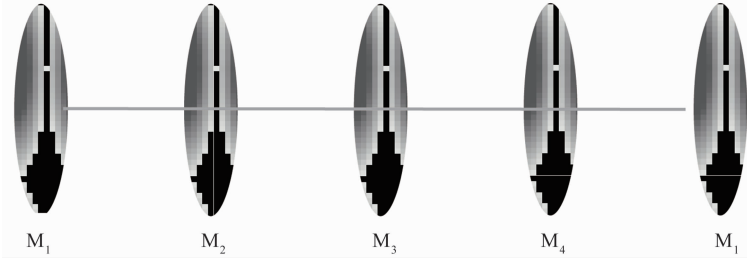


图2 四镜环形谐振腔等效展开图

$$\bar{\omega}_{oi} = -\frac{\lambda}{\pi C} \sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2}\right)^2} \quad (6)$$

以镜片 i 为参考的腰斑位置为

$$Z_{oi} = \frac{A-D}{2C} \quad (7)$$

1.2 光阑与高斯光束束腰半径的理论关系

由光学谐振腔的衍射损耗可知, 高斯光束的每一个横模的单程衍射损耗 δ 由腔体的菲涅尔数 N 来确定:

$$\delta = 10.9 \times 10^{-4.95N} \quad (8)$$

菲涅尔数 N 的定义为

$$N = \frac{a^2}{L\lambda} \quad (9)$$

式中, L 为谐振腔单边腔长; a 为光阑半径; λ 为波长。

注意到共焦腔上高斯光束光腰 ω_{oi} 与谐振腔长 L 、波长 λ 的关系为

$$\omega_{oi} = \sqrt{\frac{L\lambda}{k}} \quad (10)$$

式中, k 为常数。

由式(9)可知, 菲涅尔数 N 与光阑的半径成正比关系。比值越大, 单程损耗越小, 降低陀螺误差的可能性就越大。为保证腔内光束运行在单模状态下, 光阑尺寸的设计也是一个重要的问题。

由韩宗虎等人研究的谐振腔参数对激光陀螺性能影响的分析可知^[7], 在对称设计条件

下, 环形腔腰斑半径处是放置光阑的最佳位置, 即

$$a_i = 2.39912\omega_{00} \quad (11)$$

式(11)为光阑设计准则。

2 实验

本实验所设计的环形腔系统由四个镜片组成。四边等长, 边长用 L 表示。这些镜片连接在等间距可测量螺纹孔的光学实验平台(与地基固连)上。为隔绝其他因素带来的不可消除误差, 实验条件已恒温、隔振。谐振腔总长度是这些反射镜之间距离的总和。相向两束行波的腰斑半径位置取决于腔体结构的设计。谐振腔为整个回路提供正反馈, 使激活介质产生的辐射多次通过增益管介质, 从而在腔内维持自激振荡^[8]。实际应用中的环形腔以规则和对称的三镜或四镜最为常见^[9]。

在本实验中, 正逆两束相向行波满足驻波形成条件时, 可将环形腔看作等效的两镜腔来处理^[10]。首先, 根据式(1)判定其稳定性, 再求解高斯光束的腰斑位置及大小。已知上述结构的谐振腔束腰位置有两个, 分别为平面镜 M_1 、 M_2 的中心 Z_1 与球面镜 M_3 、 M_4 的中心 Z_3 ^[11]。忽略其他因素对传输光波的影响, 在 $R=8\text{ m}$ 和 ∞ 的情况下且光波传输一周后, 子午面和弧矢面内不同边长各自对应的谐振腔参数如表1所示。

表1 不同边长对应的谐振腔参数

L/mm	$R_1, R_2, R_3, R_4/\text{m}$	腰斑位置 Z_{oi}/mm	腰斑半径 ω_{0xi}/mm	腰斑半径 ω_{0yi}/mm	ω_{0x}/ω_{0y}
700	$\infty, \infty, 8, 8$	$Z_{01}=Z_{03}=350$	$\omega_{0x1}=\omega_{0x3}=0.503$	$\omega_{0y1}=\omega_{0y3}=0.656$	0.767
900	$\infty, \infty, 8, 8$	$Z_{01}=Z_{03}=450$	$\omega_{0x1}=\omega_{0x3}=0.495$	$\omega_{0y1}=\omega_{0y3}=0.683$	0.725
1100	$\infty, \infty, 8, 8$	$Z_{01}=Z_{03}=550$	$\omega_{0x1}=\omega_{0x3}=0.462$	$\omega_{0y1}=\omega_{0y3}=0.699$	0.661
1300	$\infty, \infty, 8, 8$	$Z_{01}=Z_{03}=650$	$\omega_{0x1}=\omega_{0x3}=0.376$	$\omega_{0y1}=\omega_{0y3}=0.709$	0.530

对表 1 中的参数分析后可知, 两平两凹式腔体有两个束腰, 它们分别在两个平面镜与两个凹面镜之间。经计算可得, 传输矩阵的结果为常数, 只与腔体本身参数有关, 并决定了环形腔的光束轮廓大小、束腰半径和光束稳定性, 而与计算参考面和环绕方向无关^[12]。光斑大小随谐振腔结构变化。依次改变恒定距离时, 腰斑位置和半径大小随之改变。大型激光陀螺在保证出光可能性的同时, 也要保证功率最大, 因此多用两凹两平对称式结构。但是一味追求功率极大值也可能导致极端条件下的腔镜失谐, 从而降低陀螺稳定性^[13]。该实验测量了不同腔长下的腰斑半径。实验结果表明, 对称式结构相对稳定且腰斑大小变换较为平整, 便于信号输出。

对于不同边长下的谐振腔, 高斯光束传输一周后, 子午面与弧矢面内腰斑半径与边长的变化关系如图 3 所示。

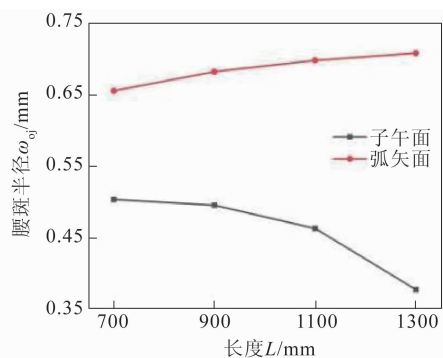


图 3 腰斑半径与长度的关系曲线

结果表明, 随着腔长的增加, 高斯光束具有不同的腰斑半径。子午面内的腰斑半径均小于弧矢面内, 且光轴长短轴的比值在减小, 形状越来越细长导致不易输出。过大的腰斑半径会导致腔内多模传输, 影响腔内光束的传输质量。在镜面曲率不变的情况下, 腔长越大, 腔内高斯光束腰斑处越细长。这对设计光阑具有一定的参考意义。

根据上述组合依次搭建激光陀螺腔体回路, 并按照式(11)计算光阑理论值。将微米级光阑放置于所计算位置处, 测试原理如图 4 所示。假设激光器输出功率稳定, 在透射镜后放

置一台功率计。首先测量光路无光阑时的功率大小, 然后监测功率计示数并调节光阑尺寸。光功率计示数的最大值与最小值对应的光阑视差值即为腰斑半径。同时监测电流对光斑及腔内光束模式的影响。不同尺寸下电流与光阑半径的关系如图 5 所示。

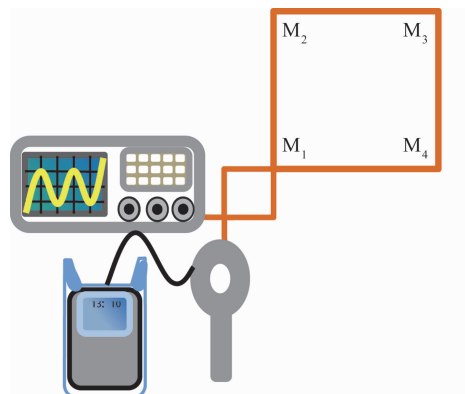


图 4 实验装置图

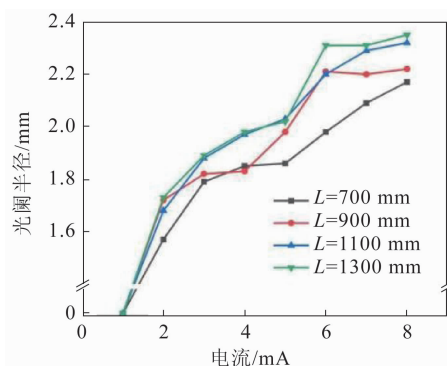


图 5 不同尺寸下电流与腰斑半径的关系

分析图 5 可得, 对于定长环形腔, 腰斑半径随着电流的变化而变化。相同电流下不同的结构也对高斯光束的参数有影响。结合高斯光束参数与电流的关系可知, 环形腔内光斑半径最小时的最优电流在出光阈值处。此时光束平整, 比值接近于 1, 容易输出且稳定性优于其他组合。

3 结论

本文将 ABCD 传输矩阵与高斯光束特性相结合, 研究了不同腔长情况下相同镜片组合的高斯光束参数及电流对它的影响, 并观测了光斑模式及输出功率。实验结果表明, 在腰斑位置上选取出光阈值电流时, 腔内传输光束越

平整、越接近于圆,那么就更容易输出且不易发生多模传输。在腰斑位置上调节电流的大小对功率输出有较大影响。大量的实验及研究工作都是基于 ABCD 光学传输矩阵开展的^[14-15]。经以上的实验与理论分析可知,插入平面镜不会影响环形腔中腰斑半径的位置分布。腔结构一旦确定,稳定性也随之确定^[7]。为保证整个环形腔不卡光,增益管等重要光学元件一般位于束腰位置,且光斑最优时电流约在出光阈值处。因此,计算传输矩阵及高斯光束参数对设计超大环形激光陀螺仪谐振腔具有重要意义。

实验结果表明,当搭建激光陀螺腔体回路时,为保证在同样条件下高效读取信号,两平两凹对称式腔体结构中选取阈值处的电流是极其重要的。这为设计超大型激光陀螺谐振腔提供了一种简单有效的思路。

致谢

感谢湖南二零八先进科技有限公司给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 张均红, 赵君轍. 惯性导航中陀螺仪的研究现状及发展趋势 [J]. 科协论坛(下半月), 2008, 2(7): 60-61.
- [2] 曾庆化, 刘建业, 赖际舟. 环形激光陀螺的最新发展 [J]. 传感器技术, 2004, 23(11): 1-4.
- [3] 杜建邦. 激光陀螺稳频反射镜的选择 [J]. 航天控制, 1998, 16(4): 64-67.
- [4] 李坤, 薛竣文, 苏秉华, 等. 基于 SolidWorks 的四镜环形腔容差简易分析方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 133-137.
- [5] 廖复中. 关于四面镜腔参数的计算 [J]. 中国激光, 1982, 9(2): 50-54.
- [6] 赵勇, 李鹏生. 基于 ABCD 定律的 LD-SMF 高斯光束模式匹配方法的研究 [J]. 光电子·激光, 2000, 20(3): 274-276.
- [7] 韩宗虎, 冯培德. 谐振腔参数对激光陀螺性能影响的分析 [J]. 中国惯性技术学报, 2002, 10(2): 32-38.
- [8] 乔亮. 2 微米激光器环形谐振腔的 ABCD 矩阵分析 [J]. 福建江夏学院学报, 2015, 5(2): 108-113.
- [9] 姜亚南. 环形激光陀螺 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [10] 王朋国, 叶萍, 胡强. 曲率变化对激光陀螺损耗及性能的影响研究 [J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1036-1040.
- [11] Rowe C H, Schreiber U K, Cooper S J, et al. Design and operation of a very large ring laser gyroscope [J]. Appl Opt, 1999, 38(12): 2516-2523.
- [12] 周炳琨. 激光原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [13] 张熙, 孙峰, 张红波. 环形激光陀螺反射镜参数的设计和分析 [C]. 天津: 中国光学学会 2010 年光学大会, 2010.
- [14] 罗时荣, 吕百达, 张彬. 平顶高斯光束的传输特性 [J]. 光学学报, 2000, 20(9): 001213-001217.
- [15] 郭福源. ABCD 矩阵与像散椭圆高斯光束的传输变换 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1997, 13(3): 7.