

文章编号 1004-924X(2012)09-1913-09

环形激光器双光路椭圆度测量系统

杨昊东^{1,2*}, 梁冬明¹, 岳寰宇¹, 范汉伟¹, 刘立武¹

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;
2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对通过测量输出光椭圆度对环形激光器进行调控的要求, 研究并建立了环形激光器双光路椭圆度测量系统。计算分析了无源环形腔对 S 线偏光和 P 线偏光的频率响应特性, 得出 S 线偏光谐振峰频率特性更适于无源环形腔的稳频。采用 S 线偏光作为外部输入光来提高稳频精度, 搭建了环形激光器双光路稳频与测量系统。环形激光器稳频系统在 10 s 内就能完成稳频, 稳频效率高, 稳频后光强波动幅度为 1.8%。提出的椭圆度测量方法使椭圆度变化幅度约为 0.65%, 减小了光强波动对测量精度的影响。实验显示, 构建的测量系统可满足椭圆度测量的要求。

关键词: 环形激光器; 环形谐振腔; 稳频; 椭圆度测量; 模式分析

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.1913

Ellipticity measurement system with double beam paths for ring laser gyroscope

YANG Hao-dong^{1,2*}, LIANG Dong-ming¹, YUE Huan-yu¹, FAN Han-wei¹, LIU Li-wu¹

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China;
2. College of Optoelectronic Science & Engineering, National University of
Defence Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: yhd_208@yahoo.com.cn

Abstract: On the basis of the requirements of cavity adjustment completed by measurement ellipticity, an ellipticity measurement system with double beam paths was researched for adjusting the cavity of a ring gyro laser. The frequency response characteristics of a square ring resonator to the S line polarized light and P line polarized light were analyzed, and the S line polarized light was chosen to stabilize the frequency of a positive resonant cavity. By inputting the S polarized beam to improve the frequency stability accurately, a frequency stabilization system and a ellipticity measurement system with double beam paths were established. By utilizing the new frequency-stabilization system and measurement methods, the frequency stabilization of the system can be realized in 10 s and the stabilization accuracy is better than 1.8%. Furthermore, the fluctuation of ellipticity has been 0.65% by the proposed method, which reduces the effect of light fluctuation on the measurement accuracy. In conclusion, the proposed system meets the needs of ellipticity measurement.

收稿日期: 2012-03-31; 修订日期: 2012-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61078017)

Key words: ring laser; ring resonator; frequency stabilization; ellipticity measurement; mode analysis

1 引言

我国较成熟的环形激光器均为方形环形激光器,方形环形激光器在理论上应是一个闭环的平面谐振腔^[1]。但环形激光器谐振腔各反射面的机械加工误差、谐振腔准直误差、谐振腔各镜片的横向角度变形误差等会使谐振腔的环形闭合光路产生非共面误差,从而形成轻微非共面腔^[2]。空间非共面导致方形环形激光器存在磁零偏较大的缺陷,严重影响环形激光器的精度^[3-8]。为了消除环形激光器空间非共面的影响就必须对环形激光器进行调控。

环形激光器闭合光路的调控方法较少,现常采用的方法为光斑监测法。该方法在调控时需要同时对环形激光器的两个出射光斑进行监测,根据其位置信息进行腔体光路调整,但此方法所需的技术条件高,光斑位置易受外界影响发生漂移,调控过程繁琐,而且精度控制也一直难以达到满意的效果。通过测量环形激光器顺时针和逆时针方向的输出光椭圆度来调控是一种新的调控方法,这种方法通过调整球面镜方位改变闭合光路非共面状态,当两个方向输出光的椭圆度相同时即完成调控^[9]。此方法所需的技术条件较低,并且调控相对容易,在消除输出镜片应力作用的条件下运用此方法进行调控具有一定的可行性^[10]。但此方法对输出光的强弱和稳定性有较高要求。首先,输出光强不能太弱,必须达到输出光椭圆度的测量要求,即达到环形激光器的工作输出光强(一般为 30 μW)。其次,该方法调整球面镜方位而改变的闭合光路的非共面角是由出射光斑监测系统测量得到的,光斑一个像素的变化(非共面角调整最小单位)会导致输出光椭圆度约 4.7% 的变化。因此,测量时输出光强要保持很高的稳定度,使同一非共面状态下椭圆度测量值波动要远小于 4.7%,以保证测量结果的精度和有效性。

通过测量环形激光器顺时针和逆时针方向的输出光椭圆度进行调控,必须建立一套稳定性和测量精度高的椭圆度测量系统。本文计算分析了

无源环形腔对 S 线偏光(S 光)和 P 线偏光(P 光)的频率响应特性,发现两个频率间隔相差很小的 S 光和 P 光都能引起环形激光器的拍频光输出,其中 S 光谐振峰频率特性更适于无源环形腔的稳频。首先,通过搭建无源环形腔频率响应特性测试系统,从实验上验证了理论计算的正确性。然后,通过输入 S 光,搭建了环形激光器双光路稳频系统和椭圆度测量系统。该系统具有较高的稳定性和测量精度,满足了调控的工作需要。

2 环形激光器频率响应特性研究

2.1 环形激光器频率响应特性分析

环形激光器在调控过程中腔内没有充入增益气体,一般是从环形激光器外部引入一束参考光来模拟有源环形激光器的工作状态。要获得稳定且较强的输出光,首先必须要对无源环形激光器的频率响应特性进行分析。

无源环形腔在模式匹配的情况下能否输出拍频光主要由环绕光路一周的光程 L' 和输入光波长 λ 两者共同决定。在计算分析中,无源环形腔的腔长 L 固定不变,通过调节压电陶瓷的外加电压改变注入激光的波长,当外部注入光的波长满足 $L'/\lambda = m$ (m 为整数)的条件时,无源环形腔就会输出谐振输出拍频光。一般情况下,外部注入光都包含 S 光和 P 光两种偏振状态,由于无源环形腔反射镜反射相位延迟的各向异性,无源环形腔 4 个镜片对 S 光和 P 光的反射相位延迟是不同的,因此 S 光和 P 光的谐振频率也存在差异。

设 $\lambda_{s1}, \lambda_{p1}, \lambda_{s2}, \lambda_{p2}$ 分别为相应的频率差,等于无源环形腔一个纵模间隔的 S 拍频光和 P 拍频光的波长, φ_s, φ_p 分别为无源环形腔 4 个镜片对 S 光和 P 光的反射相位延迟总和。由无源环形腔的谐振条件得:

$$\frac{L}{\lambda_{s1}} + \frac{\varphi_s}{2\pi} = m, \frac{L}{\lambda_{p1}} + \frac{\varphi_p}{2\pi} = m \quad (m \text{ 为整数}), \quad (1)$$

$$\frac{L}{\lambda_{s2}} + \frac{\varphi_s}{2\pi} = m + 1, \frac{L}{\lambda_{p2}} + \frac{\varphi_p}{2\pi} = m + 1 \quad (m \text{ 为整数}).$$

(2)

由式(1)、(2)可得:

$$\frac{L}{\lambda_{s1}} + 1 = \frac{L}{\lambda_{s2}}, \quad (3)$$

$$\frac{L}{\lambda_{s1}} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{L}{\lambda_{p1}}. \quad (4)$$

上式中: $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_p$, 为无源环形腔的 4 个反射镜对 S 光和 P 光反射相位延迟差的总和。

假设无源环形腔的两个纵模之间的频率间隔为 $\Delta\nu$; ν_{s1} 和 ν_{s2} 所对应的两个拍频峰之间的压电陶瓷驱动电压之差为 V_{ss} ; ν_{s1} 和 ν_{p1} 所对应的两个拍频峰之间压电陶瓷上的电压差为 V_{sp} 。在不考虑压电陶瓷响应的非线性误差与无源环形腔腔长变化影响的条件下, 压电陶瓷的驱动电压之差正比于激光器输出光的频率差, 即 ν_{s1} 和 ν_{p1} 之间的频差 $\Delta\nu_{sp}$ 为:

$$\Delta\nu_{sp} = \frac{V_{sp}}{V_{ss}} \Delta\nu. \quad (5)$$

把式(3)和式(4)中的波长改用频率表示, 并利用式(5)得到:

$$\frac{L}{c} \nu_{s1} + 1 = \frac{L}{c} (\nu_{s1} + \Delta\nu), \quad (6)$$

$$\frac{L}{c} \nu_{s1} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{L}{c} \left[\nu_{s1} + \frac{V_{sp}}{V_{ss}} \Delta\nu \right]. \quad (7)$$

由式(6)和(7)得到无源环形腔 4 个反射镜的反射相位延迟差的总和为:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{V_{sp}}{V_{ss}}. \quad (8)$$

一般情况下, $\Delta\varphi$ 较小, 从而 ν_{s1} 和 ν_{p1} 所对应的两个拍频峰之间的压电陶瓷的电压差也较小。因此, 在谐振峰附近两个频率间隔很小的 S 光和 P 光都能引起无源环形腔的拍频光输出。

在模式匹配的情况下, S 光和 P 光的输入光强 I_{in} 和输出光强 I_{out} 满足下面关系式:

$$I_{out} = \frac{T_1 T_2 I_{in}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2 R_3 R_4})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2 R_3 R_4} \sin^2(\delta/2)}. \quad (9)$$

式中: R_i 和 T_i 为第 i 面反射镜的反射率和透射率 ($i=1, 2, 3, 4$), $\delta = 2\pi L'/\lambda$ 。从上式可得, I_{out} 随着 I_{in} 的增大而增大, 为了保证有较大的输出光强 I_{out} , 应尽可能输入纯 S 光或纯 P 光。因此, 为了选择更好的输入光偏振态, 还需对 S 光和 P 光的谐振峰做进一步的分析。

在满足纯 S 输入光或纯 P 输入光的条件下, 如果 L' 和 λ 可以使 $\delta = 2m\pi$ (m 为整数), 则输出

光强将达到最大。一般情况下, R_i 差别很小, 计算中可做简化, 即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。通过式(9)可得到最大输出光强以及半功率点输出光强^[11]:

$$I_{max} = \frac{T_1 T_2 I_{in}}{(1 - R^2)^2}. \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} I_{max} = \frac{T_1 T_2 I_{in}}{(1 - R^2)^2 + 4R^2 \sin^2 \left[\frac{2\pi L'}{C} (\nu + \Delta\nu') \right]}. \quad (11)$$

式中: $\Delta\nu'$ 为拍频光谐振峰的半宽度。由式(10)和(11)可得:

$$\Delta\nu' = \frac{C}{2\pi L'} \cdot \arcsin \left[\frac{1 - R^2}{2R} \right]. \quad (12)$$

实验所使用的环形激光器 $R_s > R_p$, 所以 $\Delta\nu'_s < \Delta\nu'_p$ 。因此, S 光的谐振峰宽度较 P 光的谐振峰宽度更窄, 更为精细, 采用 S 光作为输入光进行稳频可以提高稳频精度, 更适于无源环形腔的稳频。

综上所述, 在同一个纵模条件下, 两个频率间隔很小的 S 光和 P 光都能引起无源环形腔的拍频光输出, 其中 S 光的谐振峰宽度相对于 P 光的谐振峰宽度要窄, 更适于无源环形腔的稳频。

2.2 环形激光器频率响应特性实验验证

环形激光器频率响应特性测试光路如图 1 所示。其中, He-Ne 激光器为可改变光频的压电陶瓷激光器。

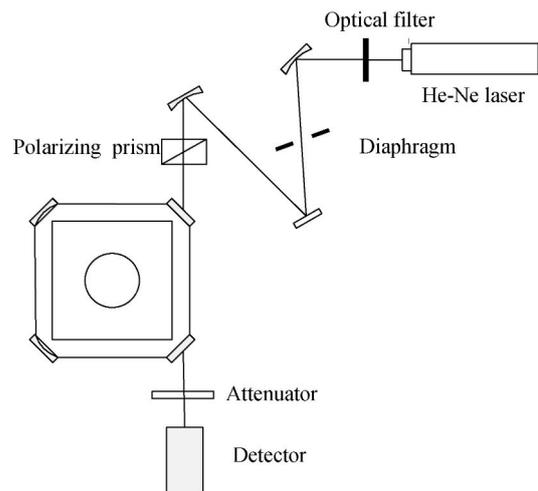


图 1 环形激光器频率响应特性测试光路

Fig. 1 Measuring optical path of response characteristic of frequency

转动起偏棱镜使入射光为纯 S 光, 得到的光

强-电压扫描曲线如图 2 所示。此图中,在激光器的扫描频率范围内有两个不同的频率可以使无源环形腔发生谐振,从而在 0~250 V 出现两个

TEM₀₀ 模的拍频峰,两谐振频率之差正好等于无源环形腔的一个纵模间隔。入射光为纯 P 光时,结果相同。

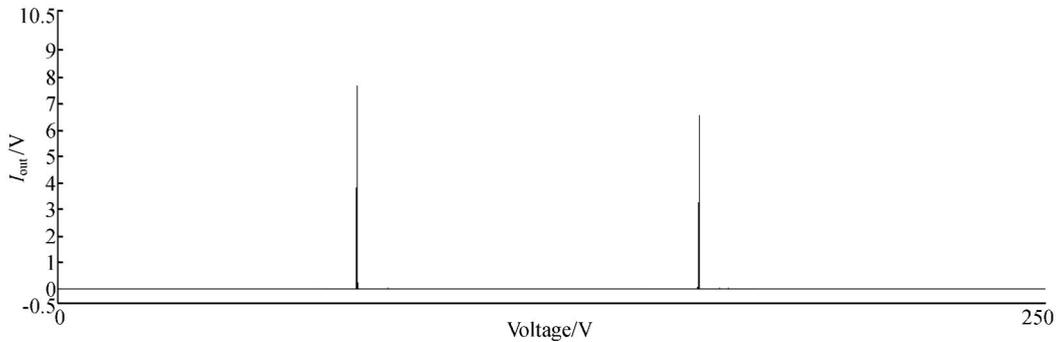


图 2 纯 S 光入射条件下的光强-电压扫描曲线

Fig. 2 Light intensity variation with voltage under condition of inputting pure S polarized beam

转动起偏棱镜使入射光偏振方向偏离 P 方向约 35°, 谐振峰的精细结构如图 3(a) 所示。用检偏棱镜测得,较宽的峰对应的拍频光为 P 光,而较窄的峰对应的拍频光为 S 光。S 光拍频峰半宽度对应的压电陶瓷扫描电压范围约为 0.011

V, P 光拍频峰半宽度对应的压电陶瓷扫描电压范围约为 0.089 V。

旋转起偏器改变入射光的偏振分量大小,在增强入射光 S 分量的情况下得到的结果如图 3(b) 所示,此时 S 拍频光变强, P 拍频光变弱;而在

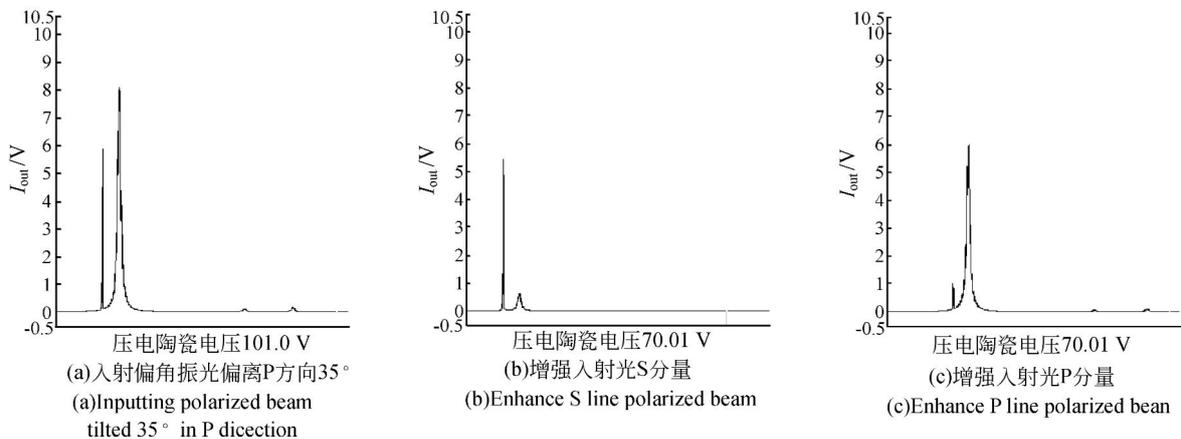


图 3 谐振频率附近的光强-频率扫描曲线细节

Fig. 3 Details of light intensity variation with voltage near resonance frequency

增强入射光 P 分量的情况下得到的结果如图 3(c) 所示,此时 P 拍频光变强, S 拍频光变弱。在入射光偏振分量大小的改变过程中,两谐振峰对应的压电陶瓷电压间隔(频率间隔)保持不变。

由以上实验可知,在同一个纵模条件下,两个频率间隔很小的 S 光和 P 光都能引起无源环形腔的拍频光输出, S 光的谐振峰宽度相对于 P 光的谐振峰宽度要窄; S、P 拍频光的相对强度与输

入光 S、P 分量的相对强弱有关,要获得最大的拍频光输出必须输入纯 S 光或纯 P 光。

3 环形激光器稳频系统

3.1 环形激光器模式匹配光路

无源环形腔光路模式匹配的重要性在于,当激光器输出的单模高斯光束注入到无源环形腔中

时,如果两个谐振腔的模式是匹配的,则激光器在无源环形腔中只激发出同样的模式。如果两个腔的模式不匹配,则激光器输出的单模高斯光束会与无源环形腔中的各个模式相互耦合,产生模式的交叉激发,只有一部分能量保留到无源环形腔的相应单模上,从而导致无源环形腔的拍频输出光减弱^[12-13]。因此,无源环形腔光强测量系统必须满足模式匹配条件,即:激光器输出的高斯光束的腰斑经过系统光学元件的变换以后,所得到的像方高斯光束的腰斑必须与无源环形腔谐振腔的大小一致、位置重合^[14-15]。

为了提高激光器输出高斯光束的频率稳定性与方向稳定性,在实验中采用腔长可调的微晶玻璃偏振 He-Ne 激光器作为系统光源,激光器由平面高反镜和球面输出镜构成,腔长为 160 mm,球面镜的曲率半径为 2 m;环形激光器的腔长为 280 mm,两球面镜曲率半径为 8 m。根据上述参数并考虑到调腔光路平台的尺寸限制与可操作性要求计算得到无源环形腔的模式匹配光路系统结构如图 4 所示。

顺时针方向光路系统的具体参数为:A 和 B 采用曲率半径为 2 m 的球面反射镜;为使输入光能正入射至环形激光器的光腔光路,球面镜 A 的

激光入射角为 39.3°,球面镜 B 的激光入射角为 22.1°;为使 He-Ne 激光器的像方高斯光束的腰斑与无源环形腔谐振腔的腰斑大小一致、位置重合,从激光器输出镜到球面镜 A 的光程为 0.062 6 m,从反射镜 A 到反射镜 B 之间的光程为 0.471 m(平面反射镜用于折叠光路以适应调腔光路平台的尺寸限制),从球面镜 B 到无源环形腔二级输出片的光程为 0.12 m。

同理可得到逆时针方向光路系统参数:同样采用曲率半径为 2 m 的球面反射镜,从激光器输出镜到球面镜 A 的光程为 0.078 3 m,球面镜 A 的激光入射角为 32.6°,两个球面反射镜之间的光程为 0.736 m,球面镜 B 的激光入射角为 28.3°,从球面镜 B 到环形激光器二级输出片的光程为 0.32 m,具体光路见图 8。

实验测得,在模式匹配状态下,无源环形腔的拍频出射光强最大值为 140 μW,与不满足模式匹配条件的调腔光路系统环形激光器出射光强(约为 0.8 μW)相比,得到了大幅度增强,也远远超出了环形激光器正常工作时的出射光强(一般约为 30 μW),满足了无源环形腔输出光椭圆度测量对光强的要求。

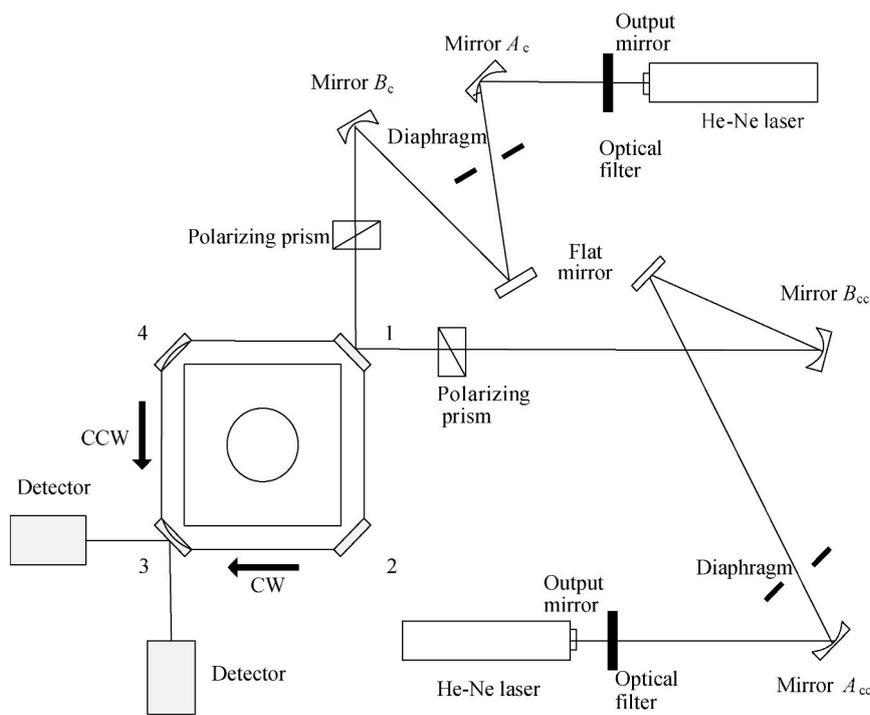


图 4 环形激光器稳频系统光路

Fig. 4 Frequency stabilization beam path of ring laser gyroscope

3.2 稳频方法与稳频精度

稳频控制是输出光椭圆度测量的关键。激光稳频从原理上可通过交流稳频和直流稳频两种途径来实现,交流稳频一般采用小抖动稳频的方法,直流稳频则是直接改变激光器腔长控制压电陶瓷的驱动电压来使光强保持在最大值位置。由于 S 拍频峰对应的压电陶瓷控制电压范围很小,如果采用小抖动稳频法可能会加剧拍频光强的波动,因此在实验中采用直流稳频方案来实现对环形激光器 S 拍频光的稳定控制。

系统采用数据采集卡的一路 D/A 通道输出 0~10 V 的线性扫描电压,此电压信号经放大器放大到 0~250 V 用于驱动压电陶瓷,以连续改变环形激光器的注入激光频率,实现稳频的粗控制;另一路 D/A 通道同样输出 0~10 V 内的线性扫描电压来驱动压电陶瓷以连续改变环形激光器的注入激光频率,实现稳频的细控制。

3.2.1 稳频方法

稳频分为粗稳和细稳两个步骤。在粗稳中,首先在 0~250 V 快速扫描得到 S 拍频光的最大峰值电压,然后以其为中心缩小扫描范围进行再次扫描以更加准确地确定 S 拍频光的最大峰值电压。经过多次扫描后,当扫描范围小于 20 V 时,确定粗扫峰值电压并保持粗稳电压不变,进入连续采样开始细扫描,粗稳流程如图 5 所示。

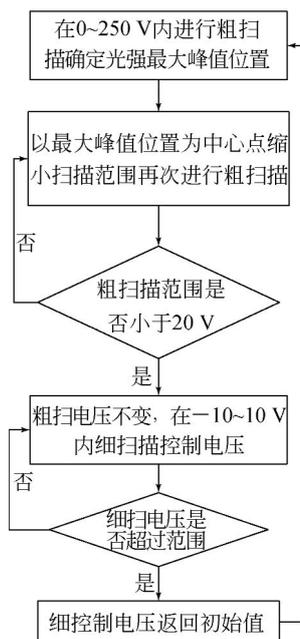


图 5 拍频光的稳频控制程序流程图

Fig. 5 Flow chart of stabilizing frequency

在细稳中,考虑到环形激光器的高敏感性和 S 拍频光谱共振峰宽度窄的特点,采用根据不同光强区域设置不同反馈步长这种新的细稳方法。该方法定义程序每一次反馈时细控制电压的变化量为反馈步长,程序需要根据拍频光强的绝对大小和相对变化来对反馈步长进行智能调节。图 6 是在 S 拍频光最大强度为 0.55 V 时实验设定的拍频光强与反馈步长之间的关系曲线。

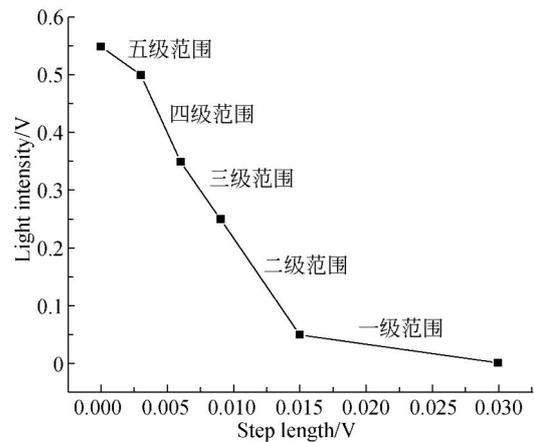


图 6 拍频光强与反馈步长之间的关系

Fig. 6 Relationship between light intensity of output beam and step length

3.2.2 稳频精度

由于环形激光器的高敏感性,气流和振动等因素都会影响稳频系统的稳频精度。因此,每一级的光强覆盖范围与反馈步长都要通过反复实验得到最佳的经验参数,将各种影响减小到最低。环形激光器稳频系统在 10 s 内就能完成稳频,稳频效率高。稳频后光强的波动小,波动幅度为 1.8%。在激光器充分预热的条件下环形激光器拍频光的单次稳定时间可达 15 min 以上,满足椭圆度测量时间的要求。拍频光的稳频效果图如 7 所示。

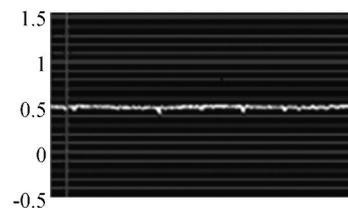


图 7 拍频光的稳频效果

Fig. 7 Frequency-stabilization effect of output beam

4 环形激光器双光路椭圆度测量系统

4.1 环形激光器双光路椭圆度测量光路

双光路输出光椭圆度测量光路结构复杂,所需光学器件多。既要能在空间有限的光学平台上搭建两套模式匹配的光路,还要留有足够的空间用以放置椭圆度测量器件。双光源顺、逆时针双光路输出光椭圆度测量系统如图 8 所示,其中平面镜片 2 为输出镜片,Detector1 和 Detector2 分

别为顺时针光路测量用和稳频用探测器,Detector3 和 Detector4 分别为逆时针光路测量用和稳频用探测器。虽然系统为双光路,但是两个光路不能同时进行测量与稳频。由于顺时针光路的入射激光被逆时针激光器的输出片反射后沿原光路返回会形成拍频现象,反之亦然。因此,在对顺时针光路进行稳频控制和测量时,用黑屏挡住逆时针激光器的出光孔,从而消除拍频现象^[6]。采用同样的方法也可以实现对逆时针光路的椭圆度测量。

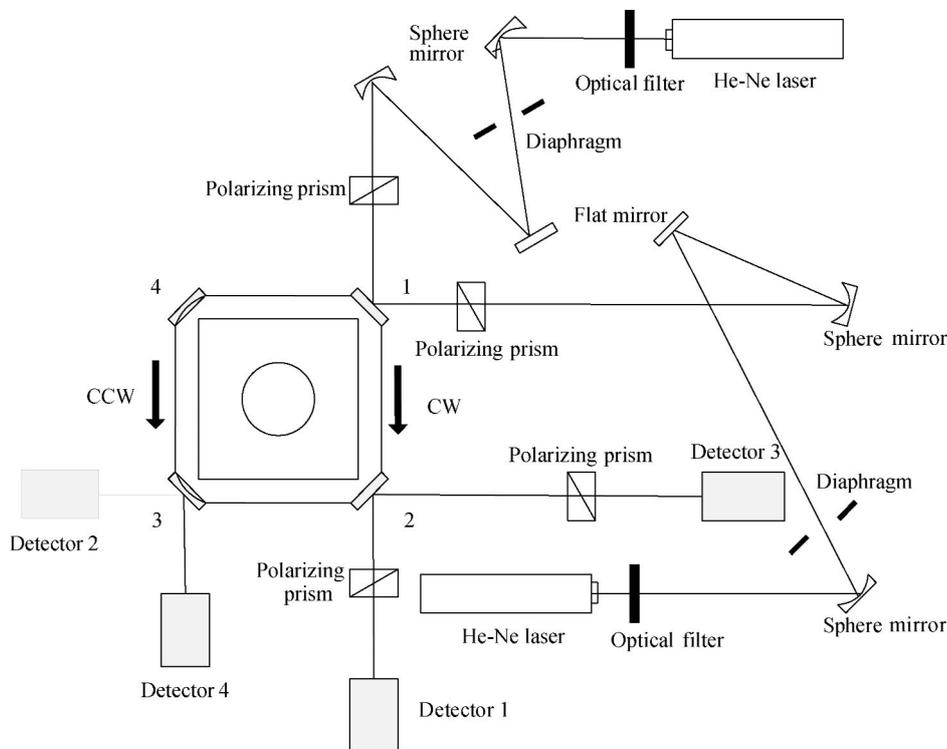


图 8 双光路输出光椭圆度测量系统

Fig. 8 Ellipticity measuring system of double output beam path

4.2 测量方法

在输出光椭圆度的测量过程中,由于温度和环境干扰等因素的影响,He-Ne 激光器的光强不可避免地会发生随机波动。这种输入光自身功率的波动难以通过稳频系统进行控制,为了进一步提高数据精度还需有合理的椭圆度测量方法。

旋转检偏棱镜使输出光分别达到最大和最小,分别测得环形激光器输出光的长轴强度和短轴强度,则输出光的椭圆度 E 可以表示为:

$$E = \frac{I_m}{I_l} \tag{13}$$

其中: I_m 为短轴光强, I_l 为长轴光强。

但是由于激光器稳频工作点的变化会引起其输出功率的改变,这将导致环形激光器的拍频输出光强在测试过程中会随着测量时间的延续而有一定的起伏变化。采用把测量光强与稳频光强的比值作为相对长轴和短轴强度的方法可减小光强波动对椭圆度测量的影响,提高数据精度。椭圆

度的计算公式如下:

$$E' = \frac{\frac{I_{mm}}{I_{s1}}}{\frac{I_{ml}}{I_{s2}}} \quad (14)$$

其中: I_{mm} 是短轴测量光强, I_{s1} 是测量短轴光强时

的稳频光强; I_{ml} 是长轴测量光强, I_{s2} 是测量长轴光强时的稳频光强。

为了验证此方法能否消除激光器输出光强变化对椭圆度测量的影响, 连续 5 次测量 S 拍频光的椭圆度, 并分别按式(13)和(14)计算椭圆度, 得到的结果列于表 1 中。

表 1 拍频光椭圆度测量的重复性

Tab. 1 Repeatability of ellipticity measurement

测量序号	I_{ml}/V	I_{s2}/mV	I_{mm}/mV	I_{s1}/mV	$E/10^{-3}$	$E'/10^{-3}$
1	4.618 9	468.756 8	18.226 7	469.216 7	3.946 1	3.942 3
2	4.637 1	471.134 2	18.561 0	472.789 3	4.002 7	3.988 8
3	4.618 4	469.891 9	18.181 6	468.150 5	3.936 8	3.951 4
4	4.619 1	471.116 9	18.046 6	465.524 9	3.906 9	3.953 9
5	4.618 4	469.891 8	18.361 0	469.598 1	3.975 6	3.978 1

从表 1 中的数据中可知稳频光强在测试过程中存在缓慢的波动, 而且式(14)计算得到的椭圆度所受的波动影响明显相对较小, 变化幅度约为 0.65%。所以, 式(14)所述测量方法能够提高实验的可重复性和数据精度。

4 结 论

本文对环形激光器双光路椭圆度测量系统进行了研究, 首先, 在同一个纵模条件下, 两个频率间隔很小的 S 光和 P 光都能引起无源环形腔的拍频光输出, 而 S 光的谐振峰宽度相对于 P 光的

谐振峰宽度要窄, 更适于无源环形腔的稳频。第二, 环形激光器稳频系统在 10 s 内就能完成稳频, 稳频效率高。稳频后光强的波动小, 波动幅度为 1.8%。在激光器充分预热的条件下环形激光器拍频光的单次稳定时间至少可以达到 15 min 以上, 满足椭圆度测量时间的要求。最后, 通过采用把测量光强与稳频光强的比值作为相对长轴和短轴强度的测量方法, 椭圆度变化幅度约为 0.65%, 减小了光强波动对椭圆度测量的影响, 提高了实验的可重复性和数据精度。

以上工作对环形激光器的调控、稳频和椭圆度测量有着重要意义。

参考文献:

- [1] CHOW W W, GEA-BANACLOCHE J, PEDROTTI L M, et al.. The ring laser gyro [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, 57:67-72.
- [2] SIEGMAN A E. Laser beams and resonators: beyond the 1960s [J]. *IEEE Journal of Special Topics in Quantum Electronics*, 1999, 21:553-559.
- [3] SMITH A. Distortion-induced magnetic field bias in the square ring laser [J]. *Proceedings of SPIE Technical Symposium East*, 1983, 16:412-416.
- [4] MARTIN J. Out-of-plane laser gyro configurations and magnetic biases [J]. *Proceedings of SPIE Physics of Optical Ring Gyros*, 1984, 22:478-482.
- [5] MARTIN J. Non-planar gyros and magnetic biases [J]. *Proceedings of SPIE Physics of Optical Ring Gyros*, 1984, 24: 487-491.
- [6] SHENG SH CH. Optical-axis perturbation singularity in an out-of-plane ring resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1994, 19:673-679.
- [7] COTE L G, OAKS T. System for reducing the sensitivity of a ring laser gyro to changes in a magnetic field; U. S. Patent 4,698,823 [P]. March 21, 1987.
- [8] GOLYAEV A Y D, DMITRIEV V G. Ring gas lasers with magno-optical control for laser gyroscopy (invited paper) [J]. *Quantum Electronics*, 2000,

- 30:327-330.
- [9] MOORE H, DURANCE D. Method and apparatus for planar alignment of a ring laser gyroscope for minimum magnetic bias sensitivity; U. S. patent 4 850 708[P]. July25, 1989.
- [10] 杨昊东,袁杰,王立涛. 轻微非共面腔的应力作用研究[J]. 应用光学,2011,32(4):641-645.
YANG H D, YUAN J, WANG L T. Stress effect of output mirror in slightly nonplanar resonators [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 641-645. (in Chinese)
- [11] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M] Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [12] BAXTER T D, SAITO T T, SHAW G L. Mode matching for a passive resonant ring laser gyroscope[J]. *Applied Optics*, 1983, 22:16.
- [13] SAVEH M R, BILGER H R, HABIB T. Optical resonator with an external source: excitation of the Hermite-Gaussian modes [J]. *Applied Optics*, 1985, 24:22.
- [14] PAXTON, LATHAM W P. Ray matrix method for the analysis of optical resonators with image rotation [J]. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1985, 554:159.
- [15] YUAN J, LONG X W, LIANG L M, *et al.*. Nonplanar ring resonator modes: generalized Gaussian beams[J]. *App. Opt.*, 2007, 46:133.

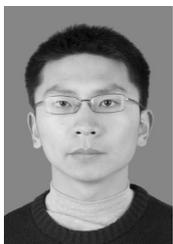
作者简介:



杨昊东(1984—),男,甘肃天水人,硕士,工程师,2007年,2010年于国防科学技术大学分别获得学士、硕士学位,主要从事新型激光器的研究。E-mail: yhd_208@yahoo.com.cn



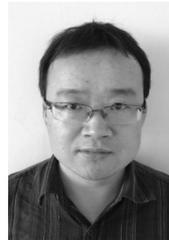
梁冬明(1984—),男,广西桂林人,工程师,2007年于清华大学获得学士学位,2009年于国防科学技术大学获得硕士学位,主要从事光学精密测量仪器的研究。E-mail: disappear14@163.com



岳寰宇(1988—),男,河南商丘人,工程师,2009年于上海交通大学获得学士学位,主要从事激光器模式理论的研究。E-mail: yhyml210@sina.com



范汉伟(1984—),男,湖北孝感人,工程师,2005年于华中科技大学获得学士学位,主要从事光学精密仪器的研究。E-mail: marco8748@163.com



刘立武(1982—),男,陕西西安人,工程师,2005年于兰州理工大学获得学士学位,2008年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事计算机软件程序设计的研究。E-mail: llwlu@gmail.com