

文章编号: 1001-4322(2005)11-1601-04

大口径元件反射率的镜面扫描精密测量系统*

易亨瑜, 彭 勇, 胡晓阳, 王耀梅, 王文东, 周文超, 郑为民, 黄祖鑫, 廖 原

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了测量高功率激光传输系统中大口径高反射率元件, 研制了一种镜面扫描的精密测量系统。介绍了该系统的结构及其工作原理, 分析了影响系统测量精度的因素, 理论上估算的测量精度为 2×10^{-5} 。在直腔下对该系统的性能进行了实验测试, 分析表明, 系统的测量不确定度优于 $2.052\ 28 \times 10^{-5}$, 最大测量误差为 $3.554\ 04 \times 10^{-5}$, 与理论预计结果吻合较好。对大口径元件进行的多次实验扫描测试, 结果显示, 镀膜加工误差导致反射率分布是关于镜面中心呈旋转对称。该系统的使用大大简化了元件表面反射率分布的测量。

关键词: 光学测量; 反射率; 光腔衰荡; 测量精度; 大口径

中图分类号: TN247

文献标识码: A

高功率激光传输系统有许多反射镜, 这些镜面上存在的光能吸收, 降低了靶目标上的激光功率密度, 阻碍了高功率激光传输系统进一步发展。具有超高反射率(反射率大于 99.99%)的反射镜, 在提高激光系统的效率和输出功率以及最终的光束质量方面具有十分重要的作用, 尽快解决光学元件的高反射率测量问题, 对于高功率激光系统的发展具有现实意义。光腔衰荡技术是一种高反射率精确测量方法。文献[1~3]研究了腔长失调、腔镜角度失调、探测器口径尺寸、探测器响应性能对光腔衰荡法测量精度的影响, 分析了腔失调的现象, 并讨论了实验调节判据; 在实验上, 文献[4~9]利用 OPO 可调谐光源或单波长光源对高反射率元件进行了实验测量。在以往的实验研究中, 只能对元件表面上一点进行反射率测试, 而采用不同的镀膜工艺可能导致元件表面各处的反射率存在差异。高功率激光传输技术的发展, 对大口径元件的反射率分布提出了很高的测试需求, 从而促进镀膜工艺的提高。

本文根据大口径元件的测试需要, 在理论研究和文献[9]的基础上, 利用 He-Ne 激光作为导引光, 建立 $1.315\ \mu\text{m}$ 单波长的大口径高反射率测量系统, 从理论和实验两个方面分析了系统测量精度, 并对大口径元件进行了扫描测量实验。

1 系统结构及工作原理

光腔衰荡法是通过测量单脉冲光辐射在谐振腔中的衰减时间, 求出谐振腔的总损耗, 进而得到腔镜或插入镜片的反射率。利用光腔衰荡特性, 可以建立直型和折叠型衰荡光腔, 进行被测镜片的反射率的测定工作。图 1 是 $1.315\ \mu\text{m}$ 单波长的光腔衰荡法反射率测量系统。选择相同的两块镜片 M_1 和 M_2 作为腔镜, 构成腔长为 $2\ \text{m}$ 的直型衰荡腔; 在转台上插入大口径平面反射镜 M_3 , 通过转臂上腔镜的旋转形成等腔长的折叠腔。选择 $1.315\ \mu\text{m}$ 的 YAG 激光器为测量光源, 其输出光束为 TEM_{00} 模, 在调试中以 He-Ne 激光器为 YAG 的导引光; BS_1 和 BS_2 是分束耦合镜, L_1, L_2 和其中光阑实现入射光束和衰荡腔的模式匹配; 由 Newfocus 公司的快速光电探测器和 Angilent54832B 数字示波器组成探测单元。为了提高测量精度, 根据文献[8]在探测器前加入聚焦透镜。

若谐振腔损耗主要是腔镜不完全反射引入的损耗, 设腔镜反射率分别为 R , 衰荡腔腔长为 L , 光速为 c , 在直腔方式下衰荡时间为 τ_0 , 则

$$R = \exp\left(-\frac{L}{c\tau_0}\right) \approx 1 - \frac{L}{c\tau_0} \quad (1)$$

设待测的大口径平面反射镜的反射率为 R_3 , 插入后折叠腔的衰荡时间变为 τ , 则

$$R_3 = 1 - \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \quad (2)$$

* 收稿日期: 2005-07-21; 修订日期: 2005-09-29

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(20030442)

作者简介: 易亨瑜(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 从事光学检测技术的研究; E-mail: yihengyu1@sina.com。

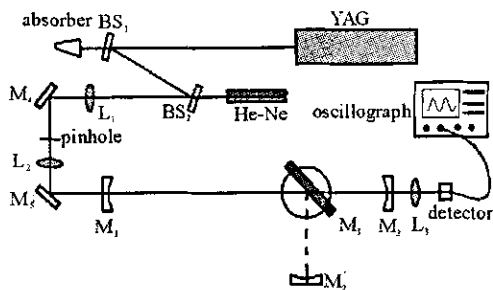


Fig. 1 System of cavity ring-down

图 1 大口径高反射率精密测量系统

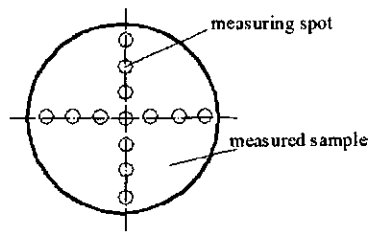


Fig. 2 Distribution of sampling

图 2 取样点分布

镀膜光学元件因生产过程中的制造误差,使实际膜厚与理论设计存在有差别。镀膜过程中的热蒸发方法,在概率上使光学元件上薄膜沉积呈正态分布。对于大口径的光学元件,不均匀膜厚导致薄膜元件上各处的反射率出现差异,而光腔衰荡系统中探测光斑一次测量的采样面积较小,因此对于大口径元件的测试,必须对镜面进行扫描测量。为了加快元件的检测速度,根据膜层厚度概率分布的特点,可以沿着元件表面两个相互垂直的直径方向进行扫描采样。如图 2 所示,测量点可以采用“十”字形分布,水平、垂直方向取样点数相等,取样点数由镜面直径大小决定。

2 系统性能测试实验

2.1 影响测试精度的因素

系统测量精度的标定问题对于大口径反射率测量是一个非常重要问题。下面给出了系统测量精度在理论和实验两个方面的评价方法。对公式(1)进行误差分析可得,理论上腔镜反射率的检测精度可表示为^[7]

$$\Delta R = (1 - R) \left(-\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \right) \quad (3)$$

由(3)式知道测量误差与待测样品的反射率 R 、腔长测量误差、时间测量误差有关。在光腔衰荡法测量系统中,由衰荡腔的品质因素可得

$$\tau = L/c\delta \quad (4)$$

忽略散射和其它损耗,衰荡腔的损耗主要有谐振腔几何偏折损耗 δ_g 、衍射损耗 δ_d 、腔内介质吸收损耗 δ_a 和腔镜不完全反射损耗 δ_r 。若要精确测量样品镜反射率,应使腔镜不完全反射损耗在数量级上大于腔内其它损耗,即腔损耗可表示

$$\delta \approx \delta_r \quad (5)$$

只有当(5)式成立时,实验中拟合出来的 τ_0 才能准确反映腔镜的不完全反射。在测量中, τ_0 值都是经过成百上千个数据点拟合得到的,故拟合精度很高,一般情况下 $\Delta \tau_0/\tau_0 < 0.001$,对腔长的测量相对误差通常为 $\Delta L/L < 0.5\%$,即有 $|\Delta L/L| + |\Delta \tau/\tau| < 1\%$,所以 $\Delta R < 0.01(1 - R)$ 。该式表明,如果 $R > 0.998$,则测量结果误差 $\Delta R < 2 \times 10^{-5}$ 。为了提高测量精度,必须采用更高反射率的光学元件作腔镜。

目前没有更高测量精度的仪器对该研制系统进行标定,在实验上需要从大量数据的分析中得到系统装置的测量不确定度。具体的评价方法如下:对于一块反射率为 R 的反射镜,进行 $i=1, 2, \dots, N$ 次测量,计算出测量的平均值 R_{avg} ,求出标准偏差 σ_{RMS} 为

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [R_i - R_{\text{avg}}]^2} \quad (6)$$

2.2 实验分析

实验中选相同两块镜子作为腔镜,在导引光下安装调试系统装置,进行信号探测,并利用示波器上的衰荡波形对衰荡腔进一步调试,使衰荡波形无明显失调。图 3(a)给出了直腔下示波器测得的衰荡波形,对数变换后如图 3(b)所示,再通过计算得到腔镜的反射率。

测量中为减小系统的偶然误差,对衰荡腔进行 10 次重复调试,对衰荡信号进行对数变换,数据统一截取后再进行线性拟合,得到该测量系统的各次测量结果,如图 3(c)所示。表 1 给出了重复调试中每次得到直腔下腔镜的反射率 R 及其衰荡时间 τ_0 。由表 1 可得,腔镜的平均值 $R_{\text{avg}} \approx 0.99839$,最大测量偏差为 $\Delta R = 3.55404 \times 10^{-5}$,与理论上预计误差在数量级上一致。计算结果表明,该系统的测量不确定度 $\sigma_{\text{RMS}} = 2.05228 \times 10^{-5}$ 。

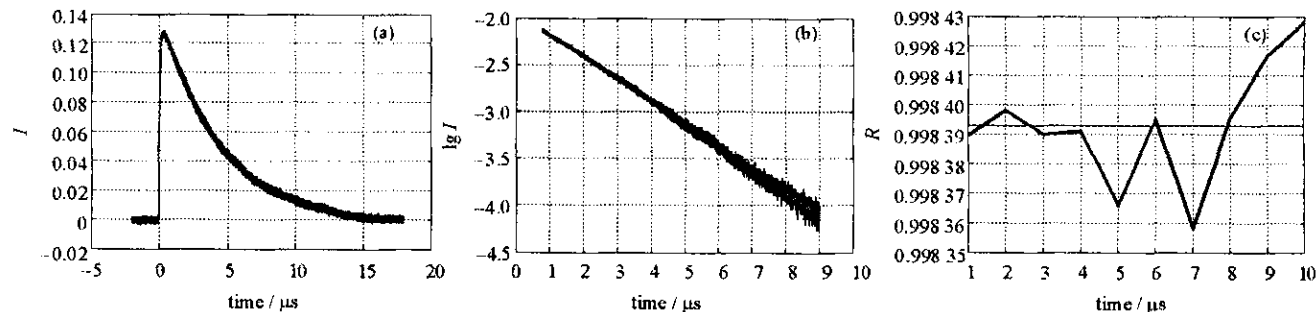


Fig. 3 Ring-down waveforms in linear cavity(a), its logarithmic transformation(b) and repetitively measured reflectivities (c)

图 3 直腔下的衰荡波形(a)及其对数变换(b)和多次反射率测量值(c)

以上测量不是在真空环境下进行的。由公式

$$\delta_r = -\frac{\ln R}{L} \quad (7)$$

计算可得,实际上直腔的 $\delta_r = 8.05649 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$,远大于非真空环境中的腔内空气介质的吸收损耗^[9] $\delta_a = 4.71 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-1}$,满足光腔衰荡法成立的近似条件,所以测量值是可靠的。

表 1 衰荡腔测量结果

Table 1 Measured results of ring-down cavity

| times | reflectivity | ring-down time/ μs |
|-------|--------------|-------------------------------|
| 1 | 0.998 390 | 4.136 425 |
| 2 | 0.998 398 | 4.158 867 |
| 3 | 0.998 390 | 4.137 979 |
| 4 | 0.998 391 | 4.140 337 |
| 5 | 0.998 366 | 4.077 008 |
| 6 | 0.998 395 | 4.150 873 |
| 7 | 0.998 358 | 4.057 718 |
| 8 | 0.998 395 | 4.151 367 |
| 9 | 0.998 417 | 4.206 750 |
| 10 | 0.998 428 | 4.238 821 |

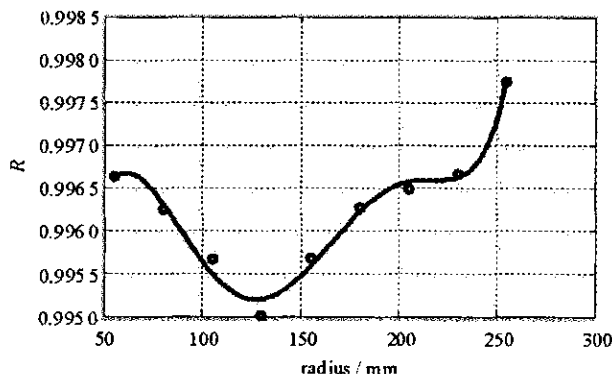


Fig. 4 Measured results of reflectivity distribution on a large aperture component

图 4 大口径元件反射率分布的测试结果

3 大口径元件检测

研制的大口径反射率测量系统可实现对 $\phi 300 \text{ mm}$ 口径以下的光学元件进行反射率镜面扫描测试。在大型衰荡腔系统调试完毕后,安装大口径元件并依据其工作角度移动转臂形成折叠腔,对该元件进行径向扫描测试。在扫描过程中,保持测量光束位置不变,在计算机的控制下利用元件支架下的精密电动平移台径向移动被测元件,从而实现图 2 中元件直径方向上反射率的逐点测量,并在扫描过程中保持了衰荡腔的腔长不变。由于受机械结构的安装限制,实际测量中只能扫描元件的大半个直径。

图 4 给出了在 $\phi 260 \text{ mm}$ 元件表面一个直径方向上从 50 mm 到 255 mm 的测量结果。以 30° 为单次旋转角,将大口径元件旋转一周,在不同的元件径向上对该元件进行扫描测试,得到类似的结果。多次测量结果显示,膜层厚度在生产过程中确实存在制造误差,该误差导致反射率分布在镜面中心呈旋转对称,与镀膜误差分布一致。可能是镀膜过程中膜厚监测点的选取原因,对于我们测量的大口径元件,其反射率分布具体表现为中心低、四周高的台阶状。这样在高功率激光照射下,元件薄膜可能呈现出环带状破坏现象。为了加快元件的检测速度,对大口径元件反射率分布的测量,可采用一种简便方法,即只扫描该元件表面一个半径方向上的反射率分布。

4 结 论

一系列的性能测试实验,证明了大口径高反射率精密测量系统无论在稳定性和精度上都达到了实际使用要求,该系统利用 He-Ne 激光器作导引光,实现了 $1.315 \mu\text{m}$ 单波长反射率的检测。该系统的研制简化了大口径元件的更换、测量过程,为精密测量高功率激光传输系统中大口径高反射率元件,提供了一个便捷而精确的

测量装置。在该系统上进行的多次重复性实验测量,结果显示该系统的测量不确定度优于 $2.052\ 28 \times 10^{-5}$ 。分析表明,提高腔镜的反射率,可以进一步提高系统的测量精度。对大口径元件进行的测试表明,镀膜加工误差导致反射率分布关于镜面中心呈旋转对称。为简化大口径元件的测量,可以只扫描光学元件一个半径方向上的反射率分布。

致 谢: 感谢刘盛林、田小强同志在系统研制初期的辛勤工作。

参考文献:

- [1] 易亨瑜, 吕百达, 胡晓阳, 等. 腔长失调对光腔衰荡光谱法测量精度的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8):547—551. (Yi H Y, Lü B D, HU X Y, et al. Influence of length misadjustment on its metrical precision of ring-down cavity spectroscopy. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8): 547—551)
- [2] 易亨瑜, 吕百达, 彭勇, 等. 探测器孔径大小对衰荡腔测量精度的影响[J]. 激光技术, 2004, **28**(3):231—236. (Yi H Y, Lü B D, Peng Y, et al. Influence of detector's aperture on metrical precision of ring-down cavity. *Laser Technology*, 2004, **28**(3):231—236)
- [3] 易亨瑜, 吕百达, 张凯, 等. 探测器性能对光腔衰荡法测量结果的影响[J]. 中国激光, 2005, **32**(7):997—1000. (Yi H Y, Lü B D, Zhang K, et al. Influence of detector responsibility on its metrical result of ring-down cavity. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(7):997—1000)
- [4] Anderson D Z, Frisch J C, Masser C S. Mirror reflector based on optical cavity decay time[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(8):1238—1245
- [5] O'Keefe A, Deacon D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser resources[J]. *Rev Sci Instru*, 1988, **59**(12):2544—2551.
- [6] 盛新志, 孙福革, 白吉玲, 等. 复合衰荡光腔技术精确检测 COIL 腔镜高反射率[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2):199—202. (Sheng X Z, Sun F G, Bai J L, et al. Precise measurement of COIL mirror's reflectivity by novel CRDS. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2):199—202)
- [7] 孙福革, 戴东旭, 解金春, 等. 用光腔衰荡光谱方法精确测量高反镜的反射率[J]. 中国激光, 1999, **26**(1):35—38. (Sun F G, Dai D X, Xie J C, et al. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(1):35—38)
- [8] 赵宏太, 柳晓军, 王谨, 等. 用光腔衰荡测定腔镜及镜片的反射率[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(1):71—73. (Zhao H T, Liu X J, Wang J, et al. Reflectivity measurement of cavity mirrors and reflective mirrors by cavity ring-down spectroscopy. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(1):71—73)
- [9] 赵宏太, 柳晓军, 詹明生. 腔衰荡法四腔镜反射率及腔内吸收测量[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(3):213—216. (Zhao H T, Liu X J, Zhan M S. Measurement of four cavity mirrors reflectivity and absorption of the cavity with cavity ring-down spectrometer. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(3):213—216)
- [10] 易亨瑜, 彭勇, 田小强, 等. 光腔衰荡法的单波长反射率测量实验研究[J]. 激光技术, 2005, **29**(4):337—339. (Yi H Y, Peng Y, Tian X Q, et al. Experimental study on reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring-down method. *Laser Technology*, 2005, **29**(4):337—339)

Precise measurement system for reflectivity scanning of large aperture components

YI Heng-yu, PENG Yong, HU Xiao-yang, WANG Yao-mei, WANG Wen-dong,
ZHOU Wen-chao, ZHENG Wei-min, HUANG Zu-xin, LIAO Yuan

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1012, Mianyang 621900, China)

Abstract: A precise measurement system of high reflectivity for scanning large aperture components in high power laser system is developed. The structure and working principle of this system are introduced, and those factors that influence its metrical precision are analyzed. According to theoretic analysis, precision of this measurement system is 2×10^{-5} . Experimental measurements for capability of this system were carried out, which show that RMS of measurement in linear cavity is better than $2.052\ 28 \times 10^{-5}$. Results give that the biggest measurement error is $3.554\ 04 \times 10^{-5}$, which is in good agreement with the analysis. Scanning experimental measurements for large aperture components were also carried out. Results show that distribution of reflectivity is circular symmetric about the center of mirrors, which is caused by machining error in the course of film plating. The reflectivity measurement system makes it very easy to measure reflectivity distribution on large aperture components.

Key words: Optical measurement; Reflectivity; Cavity ring-down; Metrical precision; Large aperture