

文章编号: 1001-3806(2005)04-0337-03

光腔衰荡法的单波长反射率测量实验研究

易亨瑜^{1,2}, 彭 勇², 田小强², 胡晓阳², 吕百达¹

(1 四川大学 激光物理与化学研究所, 成都 610064; 2 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 分析了反射率光腔衰荡法测量原理的近似条件, 讨论了共焦腔的失调特性, 计算了腔镜反射率对衰荡信号的影响。在此基础上, 为减少 OPO 激光束的衍射损耗引入的测量误差, 选择 HeNe 激光作导引光, 建立以共焦腔为衰荡腔的单波长反射率测量装置。利用直腔和折叠腔对腔镜和插入镜片的反射率进行了实验测量。直腔方式下测量的均方差小于 6×10^{-6} 。分析表明, 光腔衰荡法只适用于高反镜反射率的测量; 在光路调节中采用具有对数变换功能的示波器, 可以提高测量精度。

关键词: 光学测量; 反射率; 光腔衰荡; 测量精度; 失调; 共焦腔

中图分类号: TN248.0484.5 **文献标识码:** A

Experimental study of reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring-down method

YI Heng-yu^{1,2}, PENG Yong², TIAN Xiao-qiang², HU Xiao-yang², LYU Bai-da¹

(1. Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract Approximate condition of reflectivity measurement with cavity ring-down method is analyzed, misadjustment characteristic of confocal cavity is discussed and influence of cavity mirror's reflectivity on ring-down signal is calculated. In order to lessen metrical precision from diffraction losses of OPO laser based on the above analyses, a reflectivity measuring system for single wavelength is set up with cavity ring-down method, whose ring-down cavity is confocal cavity. Experimental measurement of reflectivity of cavity mirror and inserted mirror is carried out. The measurement RMS in linear cavity is less than 6×10^{-6} . Results show that cavity ring-down method is only for higher reflectivity and metrical precision can be improved by using logarithm transform of oscillograph in adjustment of the optical cavity.

Key words optical measurement; reflectivity; cavity ring-down; metrical precision; misadjustment; confocal cavity

引 言

随着强激光传输系统功能的扩展, 传输系统的反射镜增多, 镜片反射率的精确测试对系统的传输效率和最终光束质量的判断愈来愈重要。在 $0.620\mu\text{m}$, $0.532\mu\text{m}$, $1.315\mu\text{m}$, $0.6328\mu\text{m}$ 等波长^[1-4] 进行的反射率测量中, 已采用了光腔衰荡法^[5]。根据 OPO 激光器的波长调谐功能, 利用可见光波段进行系统光路调节, 在非可见光进行反射率测量, 可以简化光路调试^[1-3]。但是 OPO 输出光束不是 TEM₀₀ 模, 其近场光斑形状椭圆度可达 20%, 输出能量较小, 在满负荷工作时易损坏。

在只考虑腔镜透射和腔内介质吸收情况下, 文献 [1], [2] 中分析了光腔衰荡法测量原理。共焦腔用作激光谐振腔, 其腔镜角度失调对输出模式的影响, 文献 [6] 中进行了详细地讨论; 作为注入腔, 文献 [7] 中分析了其腔长失调的现象, 并讨论了调节判据。本文中综合考虑谐振腔的各种失调因素, 分析了反射率光腔衰荡法测量原理成立的近似条件, 对腔型、腔镜反射率的选择进行了深入分析, 讨论了注入腔腔型的失调特性, 计算了腔镜反射率对衰荡信号的影响。在此基础上, 利用 HeNe 激光器作导引光, 建立 $1.064\mu\text{m}$ 单波长的实验测量装置, 进行反射率的实验测量。

1 影响测试精度的因素

1.1 测量原理的近似条件

在光腔衰荡法测量系统中, 腔镜 M_1 和 M_2 构成直型衰荡腔, M_1 , M_3 和 M_2' 构成等腔长的折叠腔。在衰荡腔中, 由谐振腔品质因素可得:

$$\tau = L / c\delta \quad (1)$$

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助项目 (20030442)

作者简介: 易亨瑜 (1969), 男, 高级工程师, 现从事光学检测技术的研究。

E-mail: yihengyu@ sina.com

收稿日期: 2004-07-05; 收到修改稿日期: 2004-10-25

式中, L 为腔长, δ 为谐振腔损耗, τ 是腔内激光脉冲的光子寿命。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 。若要精确样品镜测量反射率, 则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:

$$\delta \approx \delta_r \quad (2)$$

通过直腔和折叠腔的测量, 可得到插入镜片 M_3 的反射率 R_3 为:

$$\begin{cases} \sqrt{R_1 R_2} = \exp\left(-\frac{L}{c\tau_0}\right) \\ R_3 = \frac{e^{-L/c\tau}}{\sqrt{R_1 R_2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_1, R_2 分别是镜片 M_1 和 M_2 的反射率, τ_0 为直腔衰荡时间, τ 为折叠腔的衰荡时间。

从上面分析可知, 在测量中选择高斯基模光束作为测量光束, 低损耗腔为测量腔体, 可以减少衍射损耗 δ_d 带来的测量误差。

1.2 衰荡腔型的选择

在光腔衰荡法的测量中, 衰荡腔可以采用一般稳定腔^[1,2]或共焦腔^[3,4]。实验调节精度的限制, 使腔镜、腔长失调不可避免。由于任意近轴光线都是共焦腔的二次简并光线, 为了减少几何偏折损耗 δ_g , 选择共焦腔作衰荡腔, 可以方便入射光束的实验调节。在共焦腔中, 一个腔镜任意角度的微小失调, 都可以转化为两腔镜相同角度的对称失调。假定两腔镜在 x 方向相对原准确位置都倾斜了 ε 如图 1 所示, 此时失调腔可

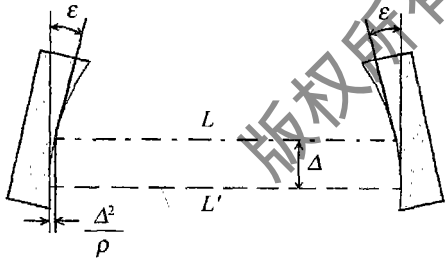


Fig 1 Mirrors misadjustment in confocal cavity

视为腔长发生了变化的非对称谐振腔。在微小失调下利用几何分析可得^[6], 相对于原谐振腔, 失调腔的腔长 L' 和腔轴平移量 Δ 为:

$$\begin{cases} L' = L + \frac{\Delta^2}{\rho} \\ \Delta = \frac{\varepsilon L}{1-g} \end{cases} \quad (4)$$

式中, L 为原腔长, g 为腔参数, ρ 为腔镜曲率半径。这样腔镜失调, 就转化为腔长失调。

1.3 腔镜反射率的选择

在衰荡腔中, 激光脉冲强度随着时间增加而减小。设初始脉冲强度为 I_0 , 在直腔方式下, 当腔镜反射率

$R_1 = R_2 = 99.9\%$ 或 99.6% 时, 分别得到图 2 所示的输出光强随时间变换的 1, 2 曲线。

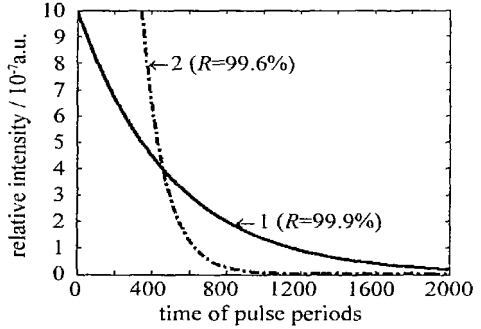


Fig 2 Ring-down wave vs time

一般地, 探测器具有 3 个量级的功率测量范围。由图 2 可知, 腔镜反射率由 99.6% 提高到 99.9% , 降低了对探测器动态范围的要求, 同时也使可用信号提高 1 倍, 从而减少 τ_0 的拟合误差^[2,3], 有助于提高测量精度。另外, 腔镜反射率不能够过大, 以免对测量光源和探测器提出要求太高。

2 测量系统

图 3 中给出 $1.06\mu\text{m}$ 单波长的光腔衰荡法反射率测量装置示意图。在导轨上的腔镜 M_1 和 M_2 构成直型衰荡腔, M_1, M_2 和转台上插入平面反射镜 M_3 构成等腔长的折叠腔, 快速光电探测器 GT102 和 Tektronix TDS7104 示波器组成探测单元。

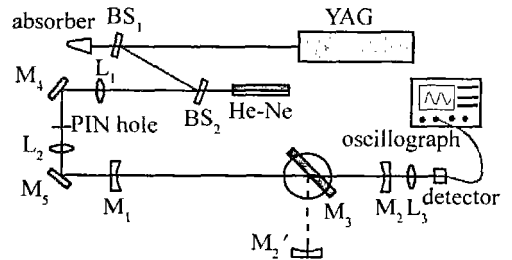


Fig 3 Schematic illustration of cavity ring-down

根据上节分析, 设计 M_1 和 M_2 的反射率 $R_1 = R_2 = R_0 = 99.9\%$; 选择 Surelite II 激光器为测量光源, 其输出光束为 TEM_{00} 模, 在出口处单脉冲波形半高宽为 7ns , 用 1623-M 型光电探测器得到图 4a, 为了避免光

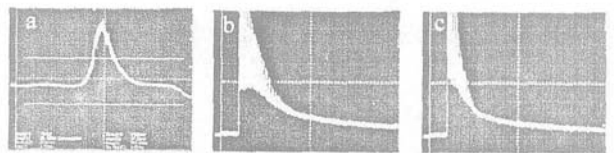


Fig 4 a—figure of single pulse b—ring-down waveform in linear cavity c—wave form of folded cavity

脉冲在衰荡腔内形成叠加, 故设计衰荡腔的腔长为 2m ; GT102 的接收口径为 0.5mm , 为了提高测量精度, 根据文献 [8], 在探测器前加入聚焦透镜 L_3 。图 3 中 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。

3 实验分析

在导引光下安装测量系统, 并利用示波器对腔进一步调试, 使衰荡波形无明显失调^[7]。测量中为减小系统的偶然误差, 对衰荡腔进行 5 次重新调试。这样在插入被测反射镜前后, 进行了直腔和折叠腔信号探测, 图 4b, 图 4c 中给出了两种腔形下示波器测得的衰荡波形。

Table 1 Measured results of ring-down cavity

times	1	2	3	4	5	average	RM S
R_0	0.998167	0.998180	0.998172	0.998179	0.998180	0.998176	5.85662×10^{-6}
R_3R_0	0.997994	0.997865	0.997913	0.998005	0.997882	0.997932	6.42705×10^{-5}

由于腔镜反射率 99.9% 的结果是用测量精度较低的常规反射率测量法得到的, 所以, 其真实值应以测量结果为准。插入反射镜的反射率 $R_3 = 0.999765$, 根据测量误差^[2,3]分析, 取 $R_0 = 99.818\%$, $R_3 = 99.977\%$ 。以上测量不是在真空环境下进行的。由公式:

$$\delta = -\frac{1}{2L} \ln(R_1R_2) \quad (5)$$

计算可得, 设计上直腔的 $\delta = 5.0025 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$, 实际上 $\delta = 9.10829 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$, 折叠腔的 $\delta' = 1.02584 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$, 远大于非真空环境中腔内介质吸收损耗^[3] $\delta_a = 4.71 \times 10^{-9} \text{ mm}^{-1}$, 满足光腔衰荡法成立的近似条件, 所以测量值是可靠的。

从实验中可以看到, 光腔衰荡法只适用于高反射镜反射率的测量。若待测样品反射率小于 97%, 脉冲信号衰荡很快, 对于 3 个量级功率测量范围的探测器, 采集的信号较少, 从而影响 τ_0 的拟合精度; 若实验上需对数据进行截取, 可能无法得到测量结果。

由于 $1.064 \mu\text{m}$ 光束为非可见光, 给实验测试精度的提高带来一定困难。表 1 显示, 直腔方式下测量的均方差小于 6×10^{-6} 。虽然折叠腔腔镜 M_2 也有精密导

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图 5 并计算出直腔下的 R_0 和折叠腔的 R_3R_0 及其平均值和均方差。计算结果见表 1。

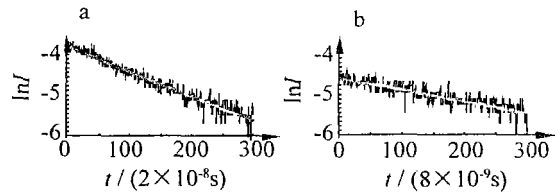


Fig 5 Logarithmic and fitting of measured signal a— linear cavity b— folded cavity

轨, 但其导轨可能存在对准误差, 使其在轴向移动时, 出现横向微小位移, 所以折叠腔的重复精度较差。在实验中, 从示波器上观察指数型衰荡波形, 只能对腔长失调进行初步调节; 若能够开发和利用示波器上信号的对数显示功能, 可以进一步提高调节精度^[8]。

参 考 文 献

- [1] 盛新志, 房本杰, 孙福革. 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
- [2] 孙福革, 孙 龙, 戴东旭. 用光腔衰荡光谱方法精确测量高反射镜的反射率 [J]. 中国激光, 1999, A26(1): 35~38.
- [3] 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.
- [4] 赵宏太, 柳晓军, 王 谨 et al. 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.
- [5] ANDERSON D Z, FRISCH J C, MASSER C S M in-or-reflector based on optical cavity decay time [J]. Appl Opt 1984, 23(8): 1238~1242
- [6] SANDERSON R L, STEIFER W. Laser resonator with tilted reflectors [J]. Appl Opt 1969, 8(11): 2241~2248
- [7] 易亨瑜, 吕百达, 胡晓阳. 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
- [8] 易亨瑜, 胡晓阳, 彭 勇 et al. 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