

文章编号: 1001-4322(2005)04-0523-05

衰荡腔测量中的腔参数选择*

易亨瑜^{1,2}, 吕百达¹, 张 凯², 胡晓阳², 万永兴²

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

摘 要: 基于谐振腔失调灵敏度参量随腔长的变化关系, 提出了一种衰荡腔, 它是由共焦腔将腔长缩短为原来的 0.73 得到的稳定腔。根据光束传输规律和失调腔矩阵方法, 以及光腔衰荡法测量原理和曲线拟合方法, 建立了腔长、腔镜角度失调下光腔衰荡法的反射率测量模型。通过数值模拟, 研究了这种稳定衰荡腔中, 腔微小失调对反射率测量结果的影响, 并与相同失调情况下共焦衰荡腔的测量结果进行了对比分析。结果表明, 这种稳定腔用作衰荡腔, 测量结果受腔镜角度失调影响较大, 而受腔长失调影响小; 其长度较短, 便于工程应用; 衍射损耗较小, 测量精度高。

关键词: 光学测量; 光腔衰荡; 反射率; 测量精度; 腔镜角度失调; 腔长失调

中图分类号: TN248

文献标识码: A

光腔衰荡法是一种高反射率测量技术。测量中衰荡腔的损耗主要有几何偏折损耗、衍射损耗、腔内介质吸收损耗和腔镜不完全反射带来的损耗^[1], 其中前三项都与衰荡腔的腔参数密切相关。将测量腔体抽真空可以消除腔内介质吸收损耗的影响。为了提高光腔衰荡法的测量精度, 必须尽可能地使腔镜的不完全反射损耗远远大于其它损耗, 所以在测量系统中应选择高斯基模光束作为测量光束, 低损耗腔为测量腔体。据文献报道, 衰荡腔可以采用稳定腔^[2,3]或共焦腔^[4,5]。

工程设计上希望测量腔体尽可能小。文献^[6]利用失调灵敏度参量, 对高反射率测量中衰荡腔的参数进行优化。由于任意近轴光线都是共焦腔的二次简并光线^[1], 选择共焦腔作衰荡腔, 可以方便入射光束的实验调节。文献^[7,8]通过与实验现象的对比, 建立了腔长失调对衰荡信号的影响模型, 分析了在共焦型衰荡腔中腔长失调对测量结果和精度的影响。在此基础上, 本文首先分析谐振腔失调灵敏度, 提出一种特殊参数的稳定腔, 以之作为衰荡腔; 考虑到实验调节精度的限制, 利用失调腔矩阵计算方法, 研究腔镜、腔长的微小失调对反射率测量结果的影响, 并与相同失调情况下共焦型衰荡腔的测量结果进行了对比。

1 衰荡腔的失调灵敏度

失调灵敏度是反映谐振腔失调特性的重要参数, 它与腔的衍射损耗成正比^[5]。在对称球面稳定腔中, 根据定义, 在两个反射镜都失调时, 谐振腔的总失调灵敏度参量为

$$s = \sqrt{\frac{2\pi L}{\lambda} \frac{1+g^2}{\sqrt{(1-g^2)^3}}} \quad (1)$$

式中: L 为谐振腔的腔长; ρ 为腔镜曲率半径; $g = 1 - L/\rho$ 为腔参数。

取两腔镜的曲率半径 $\rho = 1\,000\text{ mm}$, 可得到失调灵敏度参量随腔长的变化规律, 如图 1 所示。当 $L = \rho$ 时, 衰荡腔为共焦腔, $s^2 = 2\pi/\lambda$; 当 $L = 0.73\rho$ 时, 曲线有最小值, 为 $s_{\min}^2 = 1.754\,8\pi/\lambda$ 。与共焦腔相比, 这类稳定腔 ($L = 0.73\rho$) 的衍射损耗较小。根据文献^[6]的分析, 在其它损耗不变的情况下, 这类稳定腔用作衰荡腔, 其测量精度高于共焦腔。下面将在失调情况下分析这类稳定腔是否适宜用作衰荡腔。

2 腔失调对衰荡信号的影响

以对称球面稳定腔作为衰荡腔, 如图 2(a) 所示, a 为腔镜半径, 理想中心面在 M_0 处。设输入基模脉冲光束的初始光强为 I_0 , 其波长为 λ , 两腔镜 M_1 和 M_2 的反射率分别为 R_1, R_2 。

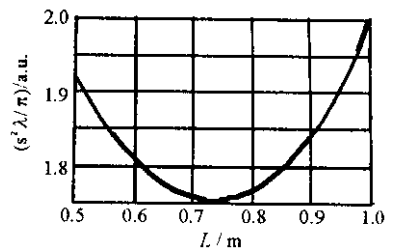


Fig. 1 Misalignment sensitivity vs cavity length

图 1 失调灵敏度随腔长的变化规律

* 收稿日期: 2004-07-15; 修订日期: 2004-11-03

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金资助课题 (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, 绵阳 919 信箱 1012 分箱; E-mail: yihengyu1@sina.com。

反射率测量系统的参数,都是在理想情况下设计的。在无失调时,入射光束进入衰荡腔后,在中心面 M_0 处的光斑半径 w_{00} ,应与本征基模的束腰半径^[5]相等。

$$w_{00} = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi}} \sqrt{\frac{1+g}{1-g}} \quad (2)$$

当腔长失调量为 β 时,两中心面 M_0 和 M 的距离 $Z = \beta/2$ 。

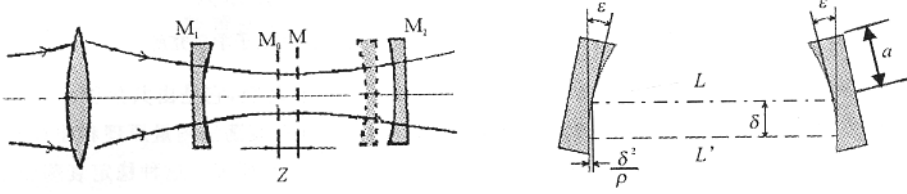


Fig. 2 Length misadjustment(a) and misalignment of cavity mirrors(b) of a cavity

图 2 谐振腔的(a)腔长失调和(b)腔镜角度失调

当腔镜角度微小倾斜时,一个腔镜任意角度的失调,都可以转化为两腔镜相同角度的对称失调。如图 2(b)所示,假定两腔镜在 X 方向相对原准确位置都倾斜了 ϵ ,此时失调腔可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^[9],相对于原谐振腔,腔轴平移量 δ 和失调腔的腔长 L' 为

$$\delta = \frac{\epsilon L}{1-g} \quad L' = L + \frac{\delta^2}{\rho} \quad (3)$$

腔镜角度失调有几种情况,会造成不同的初始光线参数。结合实验中具体现象,在腔镜角度失调时,本文只考虑初始光线的入射方向与失调腔轴线平行的情况,其光斑漂移量 $\Delta_1 = \delta$,并假设探测器对准的是初始光线。

基于上述分析,在腔失调下根据文献[1],取腔镜 M_2 处为参考面,从 M_2 反射的光线往返一周的失调 $ABCD$ 矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B & \phi & \chi \\ C & D & \Psi & \omega \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L + \beta + \frac{\delta^2}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/\rho & 1 & 0 & -2\epsilon \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L + \beta + \frac{\delta^2}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/\rho & 1 & 0 & -2\epsilon \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta_{j+1} \\ \theta_{j+1} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & \phi & \chi \\ C & D & \Psi & \omega \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_j \\ \theta_j \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

利用公式(4)计算衰荡过程中各次光斑漂移量 Δ_j 和光束对 X 轴的方向余弦 θ_j 。据文献[8]的结果, ± 20 mm 内衰荡腔注入光斑在腔内因模式失配造成的功率损耗非常小,故不考虑腔长变化引起的模式失配现象。另外,调准衰荡腔的限模光阑半径为腔镜半径 a ,实验中取 $a = 30$ mm,由于腔镜半径远大于注入的基模光斑半径,所以不考虑腔镜微小倾斜引起的衍射损耗的变换。

根据 $ABCD$ 定律,可计算出入射基模第 j 次到达腔镜 M_2 处的光束复参数 Q_j ,曲率半径 ρ_j ,光斑半径 w_j 。从文献[7]中可以看出,测量光源输出的高斯基模光束,其单个脉冲的时间波形,也是个高斯型。这样由光束复振幅表达式得到失调衰荡腔第 j 次输出脉冲的中心峰值振幅

$$E_j = \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)R_1^j R_2^j}}{w_j} \exp\left[-\frac{(r + \Delta_1 - \Delta_j)^2}{w_j^2}\right] \exp\left[-\frac{ik(r + \Delta_1 - \Delta_j)^2}{2\rho_j} - ikz\right] \quad (6)$$

式中: R_1^j 表示 R_1 的 j 次方; r 为高斯光束的长振幅半径。实验中可根据激光脉冲宽度选取共焦腔的衰荡腔长,以避免光脉冲在腔内形成叠加;当腔长缩短为原来的 0.73 变成稳定腔时,由于前后脉冲叠加部分较少,不会影响探测器接收的光脉冲在时间上的中心光强,所以探测器接收的衰荡腔第 j 次输出脉冲的中心功率为

$$I_j = \int_0^\xi |E_j|^2 2\pi r dr \quad (7)$$

式中: ξ 是探测器的接收半径。由公式(7)可分析腔失调对谐振腔基模衰荡信号的影响。

测量中常采用线性拟合方法^[2,3]来处理衰荡信号的对数变化曲线 $y(t)$ 。对于数据 $(t_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$,

取表达式为

$$y(t) = at + b \tag{8}$$

由最小二乘原理得 a 与 b 满足^[9]

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n t_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \tag{9}$$

根据理想情况下的光腔衰荡法原理,可得腔内光脉冲衰减时间 τ 和反射率测量值 R 如下

$$\tau = \frac{2L}{c} \frac{dt}{dy}, \quad R = \sqrt{R_1 R_2} = \exp\left(-\frac{L}{c\tau}\right) \tag{10}$$

式中: c 为真空中的光速。通过腔镜测量值 R 和真实值 R_0 的比较就可以分析测量精度与腔失调的关系。

3 模拟计算

取腔镜曲率半径 $\rho=1\,000\text{ mm}$,腔镜反射率 $R_1=R_2=99.9\%$,取探测器接收半径 $\xi=0.1\text{ mm}$,取激光波长 $\lambda=1.06\text{ }\mu\text{m}$,衰荡次数 $N=500$ 次。对于 $L=1\,000\text{ mm}$ 的共焦腔,实验上可通过设计耦合滤波系统使 $w_{00}\approx 0.412\text{ mm}$;对于 $L=730\text{ mm}$ 的稳定腔,调节滤波光阑使 $w_{00}\approx 0.404\text{ mm}$ 。

在理想情况下,腔长和腔镜都没有失调,两个衰荡腔都可得到探测光束相同的归一化衰荡信号,见图 3(a),对其进行对数变换并数值拟合,见图 3(b),得到腔镜反射率的模拟测量值 $R=99.9\%$,与其真实值相同。

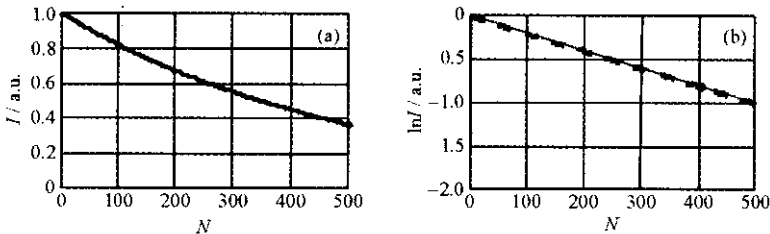


Fig. 3 Ideal ring-down waveform (a); its logarithm plot and fitting(b)

图 3 无失调时的衰荡信号(a)及其数值拟合(b)

当腔长失调时,取腔长失调量 Δ 的变化范围为 $-20\sim 20\text{ mm}$,以 5 mm 为间隔,在计算中取 7 位有效数据。根据公式(6)可以得到衰荡信号随失调量 Δ 的变化关系,当 Δ 分别为 $5,20\text{ mm}$ 时,得到图 4 所示结果。图中实线表示共焦腔得到的信号,虚线表示稳定腔得到的信号。可以看到,只要腔长失调,就必然导致衰荡信号的幅值起伏;随着失调量 Δ 绝对值的增大,信号幅值的起伏抖动加剧。

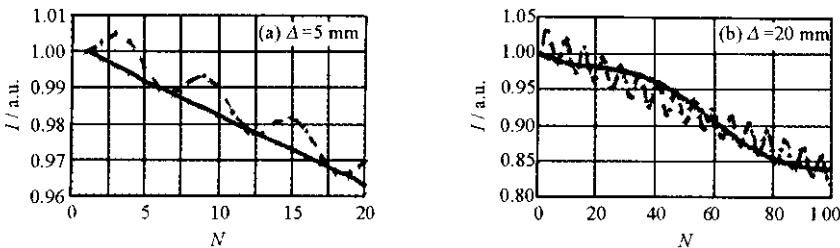


Fig. 4 Ring-down curves of length misadjustment in two cavities

图 4 腔长失调时的衰荡信号对比

通过计算,表 1 给出两种衰荡腔在不同的失调长度下得到的反射率测量结果,其中 $L=1\,000\text{ mm}$ 表示共焦腔,而 $L=730\text{ mm}$ 表示稳定腔。可以看到,对于在腔长失调,稳定腔通过数据拟合处理方式得到测量结果,其精度比共焦腔更高。这说明稳定腔受腔长失调因素的影响较小,在实验中能够降低调节难度。

下面将讨论腔镜角度失调 ϵ 对反射率测量结果的影响。在实验调节中,由瑞利判据得到衰荡腔理论上最小失调角为 $2\theta = w_{00}/L = 5\,81.964\text{ }\mu\text{rad}$ 。 ϵ 以 θ 为单位,分析中取失调角范围为 $0\sim 5\theta$ 。计算可得腔镜在不同失调角度 θ 和 5θ 下,探测光束的衰荡信号随时间的变化,如图 5 所示,图中实线和虚线分别表示由共焦腔和稳定腔得到的信号。由图可以看到,偶数次脉冲信号随失调角度增大而减弱,这一点与共焦腔得到的实验现象一致。这是因为随着失调角度的增大,探测光束的光斑漂移和方向余弦增大,在衰荡过程中会逸出探测器口径。

另外,共焦衰荡腔的偶数次脉冲信号呈有规律的变化。

表 1 长度失调下两种衰荡腔测量结果的对比

Table 1 Simulated metrical results vs length misadjustment in two cavities

Δ/mm	fitness	
	$L=1\,000\text{ mm}$	$L=730\text{ mm}$
20	0.999 002	0.999 000
15	0.998 997	0.999 000
10	0.999 002	0.999 000
5	0.998 997	0.999 000
0	0.999 000	0.999 000
−5	0.999 003	0.999 000
−10	0.998 998	0.999 000
−15	0.999 003	0.999 000
−20	0.998 998	0.999 000

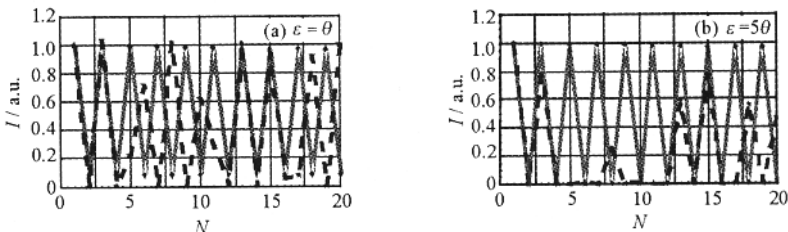


Fig. 5 Ring-down curves of tilted mirror in two cavities

图 5 腔镜角度失调时的衰荡信号对比

通过数值计算,表 2 给出两种衰荡腔在不同的失调角度下得到的反射率测量结果。由表可知,稳定腔作为衰荡腔,在腔镜角度失调下其测量结果的精度比共焦腔低,说明稳定腔受腔镜角度失调因素的影响较大。本文分析的是衰荡腔两个腔镜的对称失调,即当失调角度为 θ 时,两腔镜的相对失调为 2θ 。这样在一次反射后,就能够利用瑞利判据对腔镜角度进行调节。所以在一般情况下,角度失调可控制在 θ 范围内,其引入的测量相对误差为 10^{-4} 。借助示波器进行精细调节,可以达到更高的测量精度。

表 2 腔镜角度失调下两种衰荡腔测量结果的对比

Table 2 Simulated metrical results vs tilted angle in two cavities

ε/θ	fitness	
	$L=1\,000\text{ mm}$	$L=730\text{ mm}$
0	0.999 000	0.999 000
1	0.999 000	0.998 983
2	0.999 001	0.998 941
3	0.999 007	0.998 874
4	0.999 021	0.998 784
5	0.990 520	0.998 669

4 小 结

在相同曲率半径的腔镜下,把共焦腔的腔长缩短为原来的 0.73 得到了稳定腔,长度变短,装配成测量系统后体积小,便于工程应用;并且衍射损耗相对更小,有利于提高测量精度。通过数值模拟得到腔长、腔镜角度失调下光腔衰荡的反射率测量结果。通过对比分析可知,这种稳定腔作为衰荡腔,其测量结果受腔镜角度失调因素的影响较大;但在腔长失调下其结果的测量精度比共焦腔更高,即受腔长失调因素的影响较小。理论分析结果表明,该稳定腔适宜用作衰荡腔。

参考文献:

[1] 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. (Lü B D. Laser optics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992)

[2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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 spectroscopy. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(3):213—216)
- [5] 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)
- [6] 胡晓东, 周九林. 高反射率测量中的腔参数优化[J]. 光学学报, 1994, **14**(2):173—178. (Hu X D, Zhou J L. Optimization of cavity parameters in the reflectivity measurement. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2):173—178)
- [7] 易亨瑜, 彭勇, 胡晓阳, 等. 衰荡腔腔长失调实验分析[J]. 中国激光, 2003, **31**(s0):486—488. (Yi H Y, Peng Y, Hu X Y, et al. Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power, *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **31**(s0):486—488)
- [8] 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):993—996. (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): 993—996)
- [9] Sanderson R L, Steifer W. Laser resonator with tilted reflectors[J]. *Appl Opt*, 1969, **8**(11):2241—2248.

Choosing cavity parameters in cavity ring-down method

YI Heng-yu^{1,2}, LÜ Bai-da¹, ZHANG Kai², HU Xiao-yang², WAN Yong-xing²

(1. Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064, China;

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

Abstract: Based on the change of misalignment sensitivity with the length of cavity, a kind of ring-down cavity is put forward, which is stable resonator, and its cavity length is 0.73 times as that of confocal cavity. According to propagation equation of Gaussian beam and matrix of misadjust resonator, as well as principle of cavity ring-down method and data processing of fitting, a physical model of reflectivity measuring is set up for misadjustment of cavity length or angle of titled cavity mirrors. Applying this model, the influence of minute cavity misadjustment on measured reflectivity of cavity mirrors in the stable resonator is analyzed, which is compared to that in confocal resonator. Used as ring-down cavity, this stable resonator has, firstly, more influence of misalignment of cavity mirrors on its measured reflectivity, but less of length misadjustment; secondly, shorter cavity length which advantageous in engineering; finally, less diffraction loss and thus higher metrical precision.

Key words: Optical measurement; Cavity ring-down; Reflectivity; Metrical precision; Misalignment of cavity mirrors; Length misadjustment of cavity