

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0486-03

# 衰荡腔腔长失调的实验分析

易亨瑜<sup>1,2</sup>, 彭勇<sup>2</sup>, 胡晓阳<sup>2</sup>, 刘盛林<sup>2</sup>, 田小强<sup>2</sup>, 吕百达<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学激光物理与化学研究所, 四川 成都 610064; <sup>2</sup> 中国工程物理院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 光腔衰荡法是一种高反射率的测量技术。在腔长失调的情况下,根据高斯光束空间传输表达式和光腔衰荡法测量原理,建立了反射率测量的理论模型。利用模拟计算,得到了腔长失调对衰荡信号的影响。通过与实验现象相比较,证明了理论分析方法是合理的。

**关键词** 光谱测量; 失调; 光腔衰荡; 反射率

中图分类号 TN247

文献标识码 A

## Influence of Length Misadjustment of Ring-Down Cavity on Its Output Power

YI Heng-yu<sup>1,2</sup>, Peng Yong<sup>2</sup>, HU Xiao-yang<sup>2</sup>, LIU Sheng-lin<sup>2</sup>,

TIAN Xiao-qiang<sup>2</sup>, LÜ Bai-da<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China )  
(<sup>2</sup> Institute of Applied Electronic, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China )

**Abstract** The cavity ring-down spectroscopy is a kind of measuring reflectivity technique. According to propagation equation of Gaussian beam and metrical principle of cavity ring-down, the theory model is set up for reflectivity measure with influence of length misadjustment. Based on this model, it is numerically simulated that influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output signal. The results show the excellent agreement between simulation and experiment, and prove that the theory model is accurate

**Key words** spectroscopy measure; misadjustment; cavity ring-down; reflectivity

### 1 引言

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,进而得到其腔镜或插入镜片的反射率。利用光腔衰荡法的优良特性,可以建立直型和折叠型衰荡光腔,来测定镜片的反射率<sup>[1,2]</sup>。

由于谐振腔的衍射损耗与腔的失调灵敏度 $D^2$ 成正比<sup>[3]</sup>,为了减少衍射损耗对测量精度的影响,在测量系统中,常选择高斯基模光束作为测量光束,共焦腔为测量腔体。在实际应用中,受调节精度限制,腔长度不能严格等于镜面曲率半径。以往文献所作精度分析,没有考虑腔长失调导致衰荡腔模式变化的影响。在考虑腔长失调的情况下,本文根据高斯光束空间传输表达式和光腔衰荡法测量原理,建立了反射率测量的理论模型,并与实验结果进行了对比分析。

### 2 反射率测量的理论模型

如图1所示的共焦腔,腔长 $L$ 等于腔镜曲率半径 $\rho$ ,理想共焦腔的中心面在 $M_0$ 处。设输入脉冲光束为基模,其初始光强为 $I_0$ ,波长为 $\lambda$ ,两腔镜 $M_1, M_2$ 的反射率分别为 $R_1$ 和 $R_2$ 。

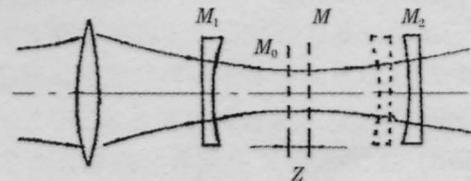


图1 腔长失调的谐振腔

Fig.1 Resonator of length misadjustment

实验中共焦腔长 $L$ 一般不易调整到与 $\rho$ 严格相等,设它们之间相差 $\Delta(\Delta=L-\rho)$ 。取腔镜 $M_2$ 处为参考面,则其 $ABCD$ 矩阵为

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,中国工程物理研究院应用电子学研究所高级工程师,主要从事激光技术研究。

E-mail:yihengyu1@sina.com

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 - \frac{2\Delta}{\rho} & -\frac{2\Delta(\Delta+\rho)}{\rho} \\ \frac{4\Delta}{\rho^2} & -1 + \frac{4\Delta^2}{\rho^2} + \frac{2\Delta}{\rho} \end{bmatrix} \quad (1)$$

两中心面  $M_0$  和  $M$  的距离  $Z=\Delta/2$ 。

输入光束是针对理想情况而设计的,其耦合到理想共焦腔中心  $M_0$  处的腰斑半径应为

$$w_{00} = \sqrt{\frac{\lambda\rho}{2\pi}} \quad (2)$$

则根据  $ABCD$  定律,在  $M$  面光束复参数、光束在  $M$  处的曲率半径和光斑半径。根据文献[4]得到的模式公式可知,对腔长为 2000 mm 的谐振腔,在腔长失调量  $\Delta < 100$  mm 内,入射基模和腔内基模的耦合系

数大于 99.94%,可以忽略模式失配在谐振腔内激发的高阶横模,所以在下面分析中只考虑基模光束在衰荡腔内的传输变换。

根据  $ABCD$  定律,入射基模第一次到达腔镜  $M_2$  处光束复参数、曲率半径  $\rho_1$  和光斑半径  $w_1$  为

$$Q_1 = \frac{i\pi w_{00}^2}{\lambda} + 2 \cdot Z + \frac{\rho}{2}$$

$$\rho_1 = \frac{1}{\text{Re}[1/Q_1]} \quad w_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \text{Im}[1/Q_1]}} \quad (3)$$

式中  $\text{Re}, \text{Im}$  分别表示对复数取实部或虚部。同理可得到入射基模第  $j$  次到达腔镜  $M_2$  处的曲率半径  $\rho_j$ ,光斑半径  $w_j$ ,再根据高斯基模复振幅表达式得到离焦共焦腔第  $j$  次的输出脉冲振幅

$$E_j = \frac{(1-R_1)(1-R_2)R_1^j R_2^j}{w_j} \exp\left[-\frac{r^2}{w_j^2}\right] \exp\left[-\frac{ikr^2}{2\rho_j} - ikz\right] \quad j=1,2,3,\dots \quad (4)$$

式中  $R_j$  表示  $R_1$  的  $j$  次方。根据激光的脉冲宽度,选取适当的衰荡腔长,可以避免光脉冲在腔内形成干涉叠加,这样探测器接收的衰荡腔第  $j$  次输出功率为

$$I_j = \int_0^a |E_j|^2 2\pi r dr \quad j=1,2,3,\dots \quad (5)$$

式中  $a$  为探测器的接收半径。由公式(5)可以分析腔长失调对衰荡信号的影响。

因为  $I_i = I_0 \exp(-t/\tau)$ ,所以  $\tau = \frac{t}{\ln I_0 - \ln I_i}$ ,假设当  $j \geq N+1$  时,光信号被探测器的噪声淹没。考虑到腔长失调对衰荡信号造成的畸变,使原始信号的精确拟合非常困难,所以采用逐点法计算  $\tau$  的平均值,即

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N \tau_j = \frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N \left( \frac{T}{\ln I_{j-1} - \ln I_j} \right) \quad (6)$$

式中  $T=2L/c$  是光束在腔内来回一次的周期。根据衰荡法反射率测量原理,腔内激光脉冲强度的衰减时间为

$$\bar{\tau} = \frac{L}{-\ln \sqrt{R_1 R_2}} \quad (7)$$

设两腔镜的平均反射率为  $R$ ,由上式得

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = \exp\left(-\frac{L}{c\bar{\tau}}\right) \approx 1 - L/c\bar{\tau} \quad (8)$$

### 3 实验装置及现象

建立如图 2 所示的光腔衰荡法测量系统。图中,腔镜  $M_1$  和  $M_2$  构成直型衰荡腔,  $M_3, M_4$  和  $M_5$  为反射镜,  $f_1$  和  $f_2$  构成光束耦合系统,示波器为 Tektronix 公司 TDS7104;探测器为重庆电子 44 所的 GT102 型光电二极管。

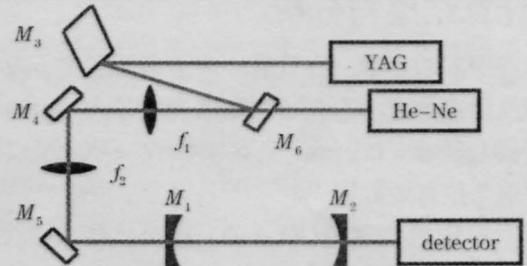


图 2 光腔衰荡测量原理

Fig.2 Schematic illustration of cavity ring-down

由于 OPO 模块输出的光束不是基模,其近场光斑形状椭圆度可达 20%。为了减少衍射损耗带来的测量误差,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 7 ns,如图 3(用 1623-M 型光电管所测)。根据光脉冲的半高宽,选择衰荡腔长为 2 m。图 2 中 He-Ne 激光器为 YAG 测量光束的导引光。

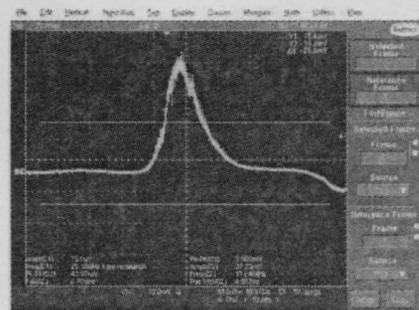


图 3 半高宽为 7 ns 的单脉冲

Fig.3 FWHM of single pulse is 7 ns

通过三镜互测,测得腔镜反射率约为 99.5%,与设计指标相符。在实验中,当腔长精确调整到  $\Delta=0$  时,得到图 4(a)的标准衰荡信号。在标准位置上将腔

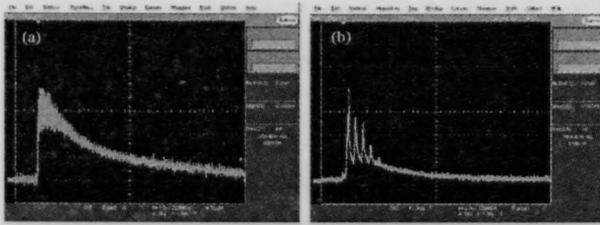


图4 实验测试信号

(a) 理想情况  $\Delta=0$ ; (b) 腔长失调  $\Delta=-65$  mm

Fig.4 Experimental results of ring-down signal

(a)  $\Delta=0$ ; (b)  $\Delta=-65$  mm

镜在 2 m 导轨上向内平移, 则可看到衰荡信号发生畸变。由于激光器热效应导致的焦斑漂移, 在腔长失调较小时, 信号变化的规律性较差; 当腔长失调增大到一定程度后, 逐渐得到较稳定的畸变信号。图 4(b) 给出了失调增大为 65 mm 时的畸变衰荡信号。

### 4 计算结果与分析

参照实验参数, 在计算中取衰荡腔长为  $\rho=2$  m, 腔镜反射率为  $R_1=R_2=99.5\%$ , 取激光波长  $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ , 探测器孔径  $a=0.1$  mm, 衰荡次数  $N=500$  次。在计算中取 7 位有效数据。

对于理想共焦腔 (即  $\Delta=0$ ), 由公式(5)得到如图 5(a)所示的标准衰荡曲线, 由公式(8)可计算出腔镜反射率  $R=99.4975\%$ , 相对误差为  $2.52945 \times 10^{-6}$ , 该

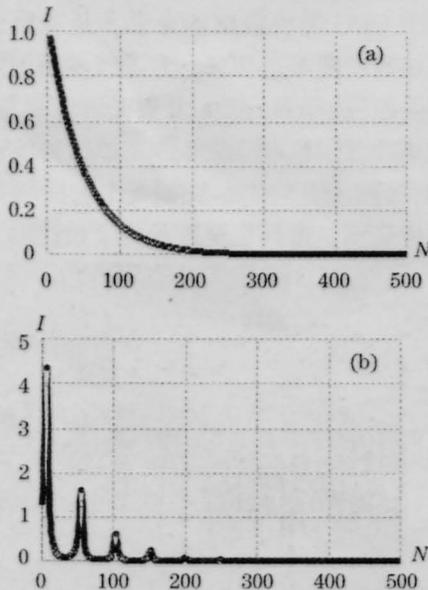


图5 模拟的测试信号

(a) 理想情况  $\Delta=0$ ; (b) 腔长失调  $\Delta=-65$  mm

Fig.5 Simulated results of ring-down signal

(a)  $\Delta=0$ ; (b)  $\Delta=-65$  mm

误差是由理论近似产生的。逐渐减少  $\Delta$  值, 则衰荡曲线在下降过程中将会出现一个尖峰, 而且该尖峰的幅值越来越大, 在时间上也进一步提前; 进一步减少  $\Delta$  值, 曲线在下降过程中将会出现多个尖峰。经分析认为, 腔长失调导致衰荡腔输出光斑半径的变化, 出现了探测信号幅值调制现象。在离焦量  $\Delta=-65$  mm 时模拟得到衰荡曲线如图 5(b), 此时计算出来的腔镜反射率  $R=91.2026\%$ , 相对误差为  $8.33907 \times 10^{-2}$ , 这主要是由腔长失调产生的。对比图 4 和图 5 可以发现, 由于探测器 GT102 带宽不够, 在一定程度上使实验现象与理论计算结果略有不同; 但在趋势上, 理论结果和实验现象基本一致。同样在腔长反方向失调时, 理论和实验也有类似结果。

### 4 结 论

利用本文建立的模型, 可以分析在选定的探测孔径下, 腔长失调对衰荡腔输出信号和测量精度的影响; 也可分析在实验室可控制的腔长失调量下, 探测器孔径对共焦衰荡腔测量精度的影响。通过这样的分析, 可以为测量系统的器件选配提供指导, 以达到较高的反射率测量精度。

计算中没有考虑失调模式在腔内的衍射损耗; 但由于腔镜尺寸远大于衰荡腔的本征基模, 因此计算带来的误差可以忽略。另外, 建立的理论模型没有考虑腔镜倾斜失调。一般地, 实验室腔镜倾斜的调节精度较高; 且微小的腔镜倾斜, 对于稳定腔, 可以转化为腔长的失调<sup>[6]</sup>, 所以决定信号形状的主要是衰荡腔的腔长。

### 参 考 文 献

- 1 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflector based on optical cavity decay time[J]. *Appl Opt*, 1984(23):1238-1242
- 2 Sun Fuge, Dai Dongxu, Xie Jinchun et al.. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method[J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):35-38  
孙福革, 孙 龙, 戴东旭. 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, **A26**(1):35-38
- 3 Lü Baidai. *Laser Optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Publishing Company  
吕百达. *激光光学* [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992
- 4 Fang Honglie. *Optical Resonator* [M]. Beijing: Science Press, 1981. 325-335  
方洪列. *光学谐振腔* [M]. 北京: 科学出版社, 1981. 325-335
- 5 R. L. Sanderson, W. Streifer. Laser resonator with tilted reflectors[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(11):2241-2248