

文章编号: 0258-7025(2005)07-0997-04

# 探测器响应特性对光腔衰荡法 测量结果的影响

易亨瑜<sup>1,2</sup>, 吕百达<sup>1</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 胡晓阳<sup>2</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>中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 探测器响应特性对衰荡信号的测量有很大影响。根据光束传输变换规律和信号叠加方式, 只利用数据拟合, 建立了探测器响应特性对衰荡信号和反射率测量结果的影响模型。通过数值运算, 模拟了不同情况下衰荡信号波形的变化, 进而分析了探测器响应特性对衰荡法测量结果的影响。研究表明, 对于现有的数据处理方法, 选择合适的探测器, 能够提高测量结果的可重复测量精度; 但其测量值 0.990045 与腔镜的真实值 0.999 存在差异。由此研究了测量结果随腔镜反射率的变化和数据预处理方式, 提出了测量结果的两种标校途径: 1) 利用模拟测量结果与腔镜真实值之间的差异, 从理论上对实验测试结果进行标校; 2) 先对衰荡波形进行梳状滤波等预处理, 再用拟合法计算反射率。

**关键词** 测量; 反射率; 光腔衰荡; 探测器; 拟合法

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

## Influence of Detector Responsibility on Its Metrical Result of Ring-Down Cavity

YI Heng-yu<sup>1,2</sup>, LÜ Bai-da<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>2</sup>, HU Xiao-yang<sup>2</sup>

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

**Abstract** Capability of the detector influences the figure of measured ring-down signal very much. According to propagation equation of Gaussian beam and overlap-add of signal, a theory model is set up to research the influence of detector on its ring-down signal and its metrical result by using data processing of only fitting. The change of ring-down waveform is numerically simulated in different case by this model, and based on this, it is calculated that relation between capability of the detector and measured reflectivity of the cavity ring-down spectroscopy (CRDS). Results show that appropriate detector can improve repeating precise of measured reflectivity for the present data processing, but its metrical result of 0.990045 is different from the true reflectivity of cavity's mirror, which is 0.999. In the end, it is studied that metrical result is changed with reflectivity of cavity's mirror, and another data processing is analyzed. Two collating ways for measured reflectivity are put forward, one is correcting in theory according to the difference between simulated result and true reflectivity of cavity's mirror; the second is adding pretreatment of ring-down waveform before data processing of fitting, such as comb filter.

**Key words** measurement; reflectivity; cavity ring-down; detector; fitness

## 1 引 言

光腔衰荡法既是一种材料弱吸收测量技术<sup>[1,2]</sup>, 也是一种光学镜片高反射率的测量技术<sup>[3]</sup>。在反射率的测量中常选择高斯基模光束作为测量光束, 共焦腔为测量腔体<sup>[4~7]</sup>。在光腔衰荡系统中, 不

同性能的探测器得到的单脉冲测量波形不同, 这直接影响了衰荡信号的形状和反射率测量结果。对于探测器, 其性能包括量程、灵敏度、接收口径以及响应特性等等。量程和灵敏度决定了该探测器能够探测到的衰荡波形长度, 从而影响衰减时间  $\tau$  的拟合

收稿日期: 2004-06-25; 收到修改稿日期: 2004-12-09

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(20030442)资助项目。

作者简介: 易亨瑜(1969—), 男, 重庆人, 高级工程师, 硕士, 主要从事激光技术研究。E-mail: yihengyu@sina.com

精度<sup>[4]</sup>。文献[8]分析了探测器的接收口径尺寸对衰荡信号的影响。由于探测器都有各自的响应特性,实验得到的单脉冲激光的测量宽度在不同程度上大于其真实宽度,这样在光腔衰荡法测量中,就会导致在探测器上形成测量信号的强度叠加,从而直接影响衰荡信号的波形。文献[9,10]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。在此基础上,针对一个直型衰荡腔<sup>[4]</sup>,本文根据信号的强度叠加方式,在不同单脉冲测量波形下,模拟了衰荡波形的变化规律,并分析了腔镜反射率测量结果与探测器响应特性的关系。

## 2 理论分析

采用两个不同的探测器,在激光器出口处进行测量。由于其响应的时间常数和后沿放电电路设计的差异,得到了图1中两种不同的单脉冲波形。

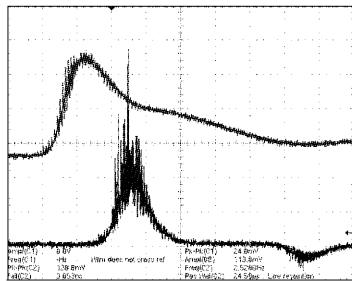


图1 同一个脉冲的测量波形

Fig. 1 Waveform of the same pulse

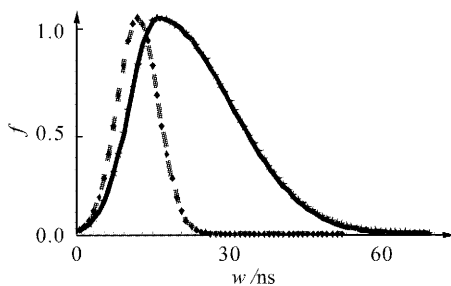


图2 模拟波形

Fig. 2 Stimulated waveform

根据图1,可用归一化高斯线型来模拟探测器上的单脉冲波形  $f(t)$ ,公式如下

$$f(t) = \begin{cases} \exp(-t^2/\omega^2), & t \leq 0 \\ \exp[-t^2/(k \cdot \omega^2)], & t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\omega$  为波形半径参量,表示探测器响应的时间常数; $k$  为波形畸变参量,表示后沿放电性能。令  $T = (k+1)\omega$  为单脉冲波形全宽,则  $T$  越小,探测器响应越快,故  $T$  是表示探测器响应快慢的性能参量。在图

2中,虚线表示  $k = 1$  时的标准高斯波形,实线表示畸变的测量波形。

在文献[9]的数学模型中,取腔长失调量  $\Delta = 0$ ,可得到任意第  $j$  个周期内衰荡腔输入到探测器的脉冲峰值功率  $I_j$ ,设  $I(t)$  是周期性峰值信号  $I_j$  和探测器“零信号”本底噪声的集合。这样利用卷积算法可模拟得到示波器上观测的衰荡波形为

$$y(t) = \int f(x)I(t-x)dx. \quad (2)$$

目前实验中反射率测量值是直接对衰荡波形信号进行拟合得到的<sup>[5]</sup>。假设当  $i \geq N + 1$  时,光信号被探测器的噪声淹没。衰荡信号的对数变换为  $z(t) = \ln y(t)$ 。对于采样数据  $(t_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n$ , 且  $n \leq N$ 。采用线性拟合,取表达式为

$$z(t) = at + b, \quad (3)$$

则由最小二乘原理, $a$  与  $b$  满足<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i z_i, \\ a \sum_{i=1}^n t_i + bn = \sum_{i=1}^n z_i, \end{cases} \quad (4)$$

所以腔内脉冲衰减时间为

$$\tau = dt/dz, \quad (5)$$

把(5)式代入数学模型<sup>[9]</sup>就可以计算镜片的反射率。

## 3 模拟计算

取激光波长  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ ,腔长  $\rho = 1500 \text{ mm}$ ,探测器孔径  $\phi = 0.1 \text{ mm}$ ,腔镜反射率  $R_0 = 99.9\%$ ,则衰荡周期为  $10 \text{ ns}$ 。假设测量光源输出的激光脉冲全宽小于  $3 \text{ ns}$ ,即激光脉冲在衰荡腔内不会形成叠加。取总采样点数  $N = 500$ ,每个周期内有  $10$  个采样点,则总采样时间为  $N = 500 \text{ ns}$ 。不考虑失调情况,计算中取  $7$  位有效数据。

### 3.1 探测器响应特性对衰荡信号的影响

取单脉冲探测波形为标准高斯型,通过数值模拟,可得到不同时间常数  $\omega$  下经过适当裁剪的衰荡波形及其相应的对数变换,如图3所示。当性能参量  $T \leq 10 \text{ ns}$  时,在图3(a),(b)中可以清楚地看到每个脉冲信号的峰值和谷值。随着  $T$  的增加,脉冲重叠程度增大,衰荡信号的波谷逐渐消失,如图3(c)所示,该图与文献[4,5]的实验现象一致。同样取单脉冲探测形状为畸变波形,也可得到类似的衰荡信号。图3(d)~(f)为衰荡信号对应的对数变换图。

### 3.2 探测器响应特性对反射率测量结果的影响

取时间常数  $\omega$  的变化范围为  $1 \sim 30 \text{ ns}$ ,在单脉

冲探测波形为标准高斯型下,利用公式(4),(5)对衰荡信号的对数曲线进行数据处理,得到腔镜测量结果,如图4中的虚线所示;在单脉冲探测波形为畸变波形时,得到图4中的实线。可以看到,图4中前段数据波动较大。这是因为当 $T$ 小于光腔衰荡周期时,衰荡信号有许多相同的“零信号”,即本底信号。

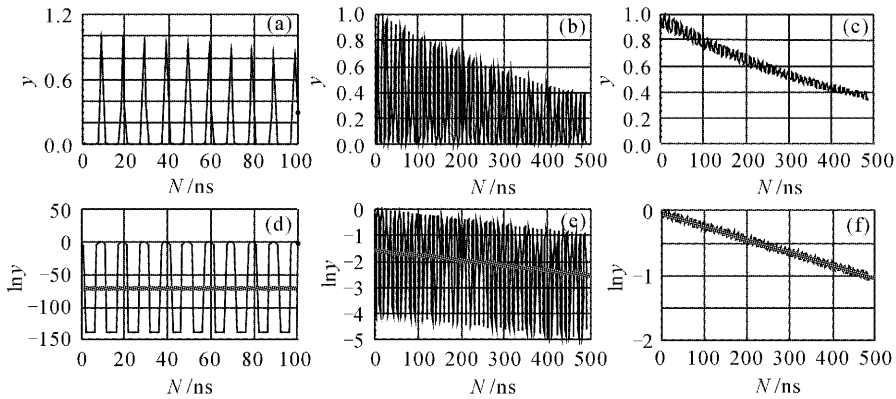


图3 模拟的衰荡信号(a)~(c)及其对数变换(d)~(f)

Fig. 3 Simulated actual ring-down waveforms (a)~(c) and its logarithm plots (d)~(f)

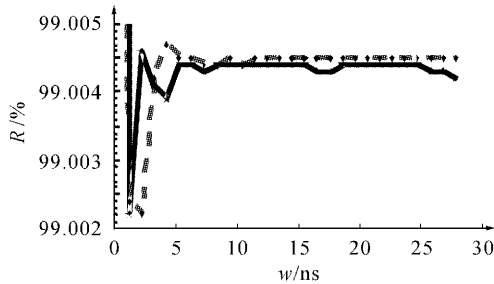


图4 在不同单脉冲测量波形下的反射率模拟测量值

Fig. 4 Contrast of simulated reflectivity between different single waveform

分析其 $n \sim 30$ 之间数据的平均值和标准差,如表1所示。由表1可得,对于现有的数据处理方法,测量结果的稳定性随着探测器响应特性的下降而增大。当 $T$ 大于一定值后,对于不同的单脉冲测量波形,测量结果都趋于稳定值,其标准差小于 $10^{-6}$ ,受探测器响应性能的影响较小。这说明在不同响应速度的探测器下,可以得到一致性较好的测试结果,有利于不同光腔衰荡系统之间进行测量结果的比对。这说明如果采用拟合法直接处理波形数据得到样品反射率结果,那么在光腔衰荡系统中可以选择响应性能适合的探测器,这样不仅能减少实验仪器成本,还可提高可重复测量精度。不过这种方式得到的测量值0.990045与腔镜的真实值0.999存在一定偏差,需要对测试结果进行修正。

这些信号的存在会严重影响数据处理的结果,所以对于现有的数据处理方法,应选择性能合适的探测器。通过对比可得,当时间常数 $\omega$ 较小时,畸变脉冲的测量结果较好;但是随着 $\omega$ 的增加,测量结果的抖动相对较大。

对图4数据进行裁剪,去掉前面 $n-1$ 个点后,

表1 模拟测量结果的分析

Table 1 Analysis of simulated measured results

Distortion parameter	Range	Average	Standard variance
$k=1$	1~30	0.990275	$1.02187 \times 10^{-3}$
	11~30	0.990045	$3.07794 \times 10^{-7}$
	21~30	0.990045	$1.17028 \times 10^{-16}$
$k=7$	1~30	0.989863	$1.07818 \times 10^{-3}$
	11~30	0.990044	$5.71241 \times 10^{-7}$
	21~30	0.990044	$6.99206 \times 10^{-7}$

### 3.3 测量结果的标校

对于同一个探测器,取其 $T=14$  ns, $k=1$ ,更换不同反射率的腔镜。通过模拟得到图5(a),(b)所示的测量结果及其相对误差随腔镜反射率的变化。可以看到,现有方法的测量准确度由腔镜自身的反射率决定。反射率越大,测量结果越准确,误差越小。

另外对数据处理方式进行研究,可以得到两种方法用来标校实验测量结果:

第一种是采用 $T=14$  ns的探测器,利用图5(a)给出了模拟测量结果与腔镜真实值之间的差异,从理论上对实验测试结果进行标校。例如,当腔镜的测量值为99.501%时,通过图5(a)的查对,可知其准确值为99.95%,理论上的相对误差小于 $10^{-6}$ 。

第二种是采用 $T \leq 10$  ns的探测器,得到图3(a)

所示的衰荡波形,然后先对衰荡波形进行预处理,再用拟合法计算反射率。其具体过程如下:对图 3(a)采用梳状滤波等变换技术,得到图 6(a)所示的各个衰荡周期内真实的峰值信号;这些峰值点的对数曲线为离散点集合,如图 6(b);再采用拟合法或文献[10]中的方法处理衰荡峰值信号,都得到腔镜反射率的测量值  $R=0.999$ ,与腔镜的真实值一致。

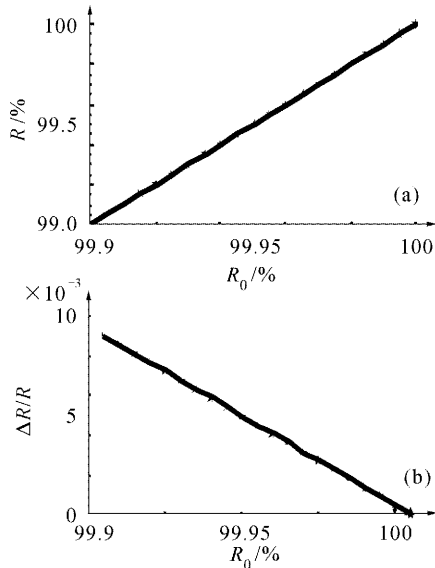


图 5 测量结果和相对误差随腔镜反射率的变化  
Fig. 5 Relation of measured results (a) and relatively error (b) with mirror reflectivity

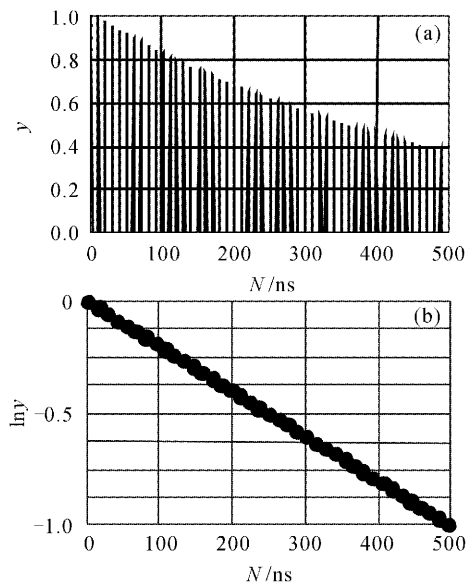


图 6 理想对数波形(a)及其对数变换(b)  
Fig. 6 Ideal ring-down waveform (a) and its logarithm plot (b)

## 4 结 论

探测器响应特性对测量结果有直接影响。目前

实验中常采用拟合法直接处理波形数据得到样品反射率,这种方式对于有一定脉冲重叠程度的衰荡波形信号可以适用,其测量结果的标准差小于  $10^{-6}$ ;不过这种方式的准确度欠佳,需要对测量结果进行标定。理论分析表明,对于没有脉冲重叠的波形数据,先通过一定变换得到真实的衰荡脉冲峰值信号,再采用拟合法处理,能够得到准确的结果。另外,因激光脉宽导致的前后相邻脉冲光束在衰荡腔内进行的强度叠加,也可以利用本文的方法进行分析。

## 参 考 文 献

- 1 A. O' Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser resources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- 2 Dai Dongxu, Sun Fuge, Kang Lu *et al.*. A cavity ring down spectrometer setup for high repeat real time measurement [J]. *Chinese J. Chemical Phys.*, 1997, **10**(6): 481~486  
戴东旭,孙福革,康路等.高重复频率实时采集的光腔衰荡光谱[J].*化学物理学报*, 1997, **10**(6): 481~486
- 3 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflector based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 1238~1245
- 4 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,戴东旭,解金春等.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
- 5 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Wang Jin *et al.*. Reflectivity measurement of cavity mirrors and reflective mirrors by cavity ring-down spectroscopy [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(1): 71~73  
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
- 6 Sheng Xinzhi, Sun Fuge, Bai Jiling *et al.*. Precise measurement of COIL mirror's reflectivity by novel CRDS [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2): 199~202  
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
- 7 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Zhan Mingsheng. Measurement of four cavity mirrors reflectivity and absorption of the cavity with cavity ring-down spectrometer [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(3): 213~216  
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
- 8 Yi Hengyu, Lü Baida, Peng Yong *et al.*. Influence of detector's aperture on metrical precision of ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(3): 231~236  
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
- 9 Yi Hengyu, Peng Yong, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **31**(Suppl.): 486~488  
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**(增刊): 486~488
- 10 Yi Hengyu, Lü Baida, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment on its metrical precision of ring-down cavity spectroscopy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8): 993~996  
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
- 11 Xu Shiliang. *Common Arithmetic in Computer* [M]. 2nd ed., Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 202~205  
徐士良. *计算机常用算法* [M]. (第二版), 北京: 清华大学出版社, 1996. 202~205