

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0373-03

光腔衰荡法反射率测量结果的准确性分析

易亨瑜

(中国工程物理院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在光腔衰荡系统中,不同性能的脉冲激光器输出的激光脉宽不同,直接影响着衰荡信号的形状,从而决定了反射率测量结果与真实值的偏离程度。根据光束传输变换规律和信号叠加方式,利用数据拟合方法,建立了激光脉宽对衰荡信号和测量结果的影响模型。通过数值运算,模拟了不同脉宽下衰荡信号的波形变化情况,并分析了当激光脉冲宽度不同时反射率测量结果随腔镜真实值的变化,进而研究了激光脉宽对衰荡法测量结果的影响。研究表明,目前的数据处理方法不能得到准确的反射率测量结果,并给出了测量结果的标校方法。

关键词 测量; 反射率; 光腔衰荡; 激光脉宽; 拟合法

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

Veracity Analysis on Measurement Results of Cavity Ring-Down

YI Heng-yu

(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Different capability laser has different pulse width, which influences the figure of ring-down waveform in the cavity ring-down system (CRDS), and makes measurement result relative departure from true reflectivity. According to propagation equation of Gaussian beam and overlap-add of signal, a theory model is set up by data fitting to research the influence of pulse laser on its ring-down signal and its metrical results. The change of ring-down waveform is numerically simulated in different cases by this model, and it is also calculated how the measurement result varies with the true reflectivity. Based on this, it is analyzed that relation between waveform of the laser and measured reflectivity of the CRDS. Results show that current data processing can not acquire exact measured reflectivity. and a collating ways for measured reflectivity is put forward.

Key words measurement; reflectivity; cavity ring-down; laser pulse width; fitness

1 引 言

光腔衰荡法是一种用于高反射镜片的反射率测量技术^[1~3]。实验数据处理中常用反射率测量不确定度作为分析指标,该指标反映了光腔衰荡法测量的重复精度,但并没有显示结果的准确度。在不考虑激光脉冲宽度等因素的情况下,文献[4]建立了腔长失调对衰荡信号的影响模型,理论分析表明光腔衰荡法的测量结果是准确的。实际上脉冲激光器输出的激光都有一定的脉冲宽度,不同性能的激光脉宽不同,导致在探测器上形成测量信号的强度叠加程度不同,从而得到不同的衰荡信号波形。在以往文献的分析中,没有考虑激光脉宽对衰荡波形的影响。本文在文献[4]的基础上,根据信号强度叠加方

式,在不同激光脉宽下,模拟了衰荡波形的变化规律,并分析了测量结果与激光脉宽的关系,讨论了光腔衰荡法中反射率测量结果的准确性问题。

2 理论分析

在衰荡光腔测量系统中,常选择高斯基模光束作为测量光束,共焦腔为测量腔体。测量系统如图 1 所示,腔镜 M_1 和 M_2 构成共焦腔。两腔镜 M_1 , M_2 的曲率半径为 ρ ,反射率分别为 R_1 和 R_2 ,在其中心面 M_0 处。当一束初始光强为 I_0 ,波长为 λ 的基模脉冲光束通过模式耦合后,沿着光轴注入到腔内,并在腔内来回反射而形成衰荡。

脉冲激光器输出的激光都有一定的脉冲宽度。

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术基金(20030442)资助课题。

作者简介: 易亨瑜(1969—),男,重庆人,中国工程物理研究院应用电子学研究所高级工程师,博士,主要从事激光技术研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

采用 Newfoucs 公司的 1623-AC-M 型光电探测器，

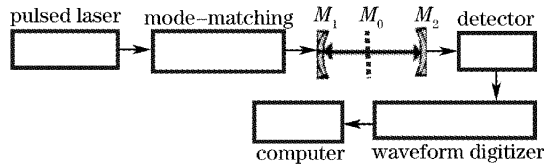
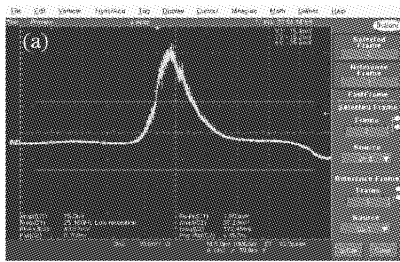


图 1 光腔衰荡法测量系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of cavity ring-down measurement system



$$f(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{w^2}\right), \quad (1)$$

式中 w 为激光脉宽。其模拟的激光器输出脉冲如图 2(b)所示。

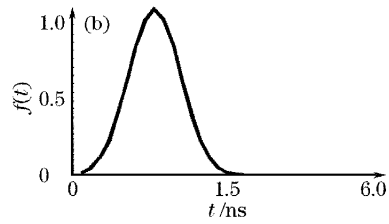


图 2 单脉冲波形(a)及其模拟(b)

Fig. 2 Waveform of single pulse (a) and its stimulated waveform (b)

在文献[4]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。利用卷积算法可模拟得到示波器上观测到的衰荡波形为

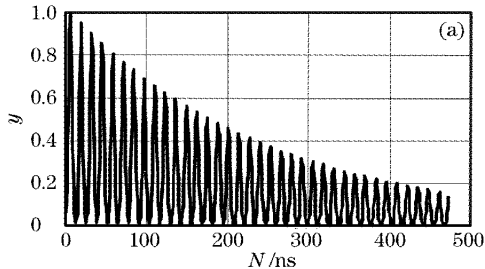
$$y(t) = \int f(x)I(t-x)dx. \quad (2)$$

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^[3]。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^[5]

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



所以腔内脉冲衰减时间为

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

把(5)式代入文献[4]的数学模型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 $\rho=2000 \text{ mm}$, 探测器孔径 $c=0.1 \text{ mm}$, 则衰荡周期为 10 ns 。取总采样点数 $N=500$, 每个周期内有 10 个采样点。不考虑失调情况。

假设腔镜反射率 $R_0=99.9\%$, 分别取不同的激光脉冲宽度 w 为 $3 \text{ ns}, 7 \text{ ns}$, 得到如图 3 所示的不同衰荡波形。当性能参量 $T \leq 10 \text{ ns}$ 时, 在图 3(a) 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(b) 所示, 该图与文献[2, 3]的实验现象一致。通过计算得到它们对应的腔镜反射率为

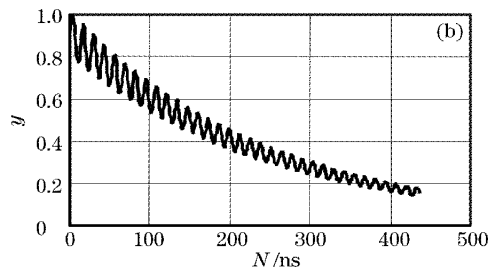


图 3 w 为 3 ns (a) 和 7 ns (b) 时得到的衰荡波形

Fig. 3 Simulated actual ring-down waveforms (a) $w=3 \text{ ns}$, (b) $w=7 \text{ ns}$

0.986816和0.987075,与真实值存在一定差异。

对于同一激光器,取激光脉冲宽度 $w=4\text{ ns}$,更换不同反射率的腔镜。通过模拟得到图4所示的测量结果随腔镜反射率真实值的变化。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。腔镜的反射率越大,测量结果越准确,测量误差越小。

以图4作为实验测试结果的标校图,将反射率实验测量值作为纵坐标,查出相应的横坐标值,则该横坐标即为反射率的真实值。

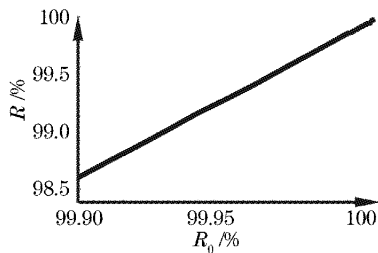


图4 测量结果与腔镜真实值的关系

Fig. 4 Relation between measured results and mirror reflectivity

4 结 论

由于脉冲激光器输出的激光都有一定的脉冲宽度,它决定着探测器上衰荡信号的强度叠加程度,影响了衰荡波形的形状,从而使反射率测量结果偏离真实值。本文研究激光脉冲宽度对衰荡波形和测量结果的影响。分析表明,即使在无腔失调情况下,目

前实验中常采用拟合法直接处理波形数据得到反射率,准确度欠佳,需要对测量结果进行标定。为了得到反射率的准确测量值,可用示波器测量出激光器输出的单个脉冲宽度,选取相关实验参量进行理论计算得到图4,利用图中模拟测量结果与腔镜真实值之间的差异,可以从理论上对实验测试结果进行标校。对于折叠腔中插入样品的反射率测量,也可用类似方法得到其真实值。

参 考 文 献

- 1 Dana Z. Anderson, Josef C. Frisch, Carl S. Masser. Mirror reflector based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 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,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
- 3 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Wang Jin *et al.*. Reflectivity measurement of cavity mirrors and reflective mirrors by cavity ringdown 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
- 4 Yi Hengyu, Peng Yong, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **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*, 2004, **31**(Suppl.): 486~488
- 5 Xu Shiliang. *Common Arithmetic in Computer* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 202~205
徐士良. *计算机常用算法* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 202~205