

文章编号: 0258-7025(2007)06-0857-04

# 宽谱连续波复合衰荡光腔技术测量高反射率

龚元<sup>1,2</sup>, 李斌成<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 提出了一种连续波复合衰荡光腔(CRD)技术,可同时确定腔镜和待测镜高反射率,无需测量系统响应,提高了测量精度。以方波调制的连续激光耦合进衰荡腔,采用锁相方式探测衰荡信号一次谐波的振幅和相位。在数据处理中消除了系统响应的影响,由对应调制频率时直腔和折叠腔衰荡信号一次谐波的振幅比值和相位差值进行频域拟合,同时得到腔镜和待测平面镜的反射率。理论上推导了频域拟合函数。对100 cm共焦腔和110 cm稳定腔分别进行了直腔和折叠腔实验,最终确定腔镜反射率99.784%,待测平面镜反射率99.668%,测量精度达到 $10^{-5}$ 量级,与测量并消除系统响应后得到的反射率结果一致。

**关键词** 测量;光腔衰荡;高反射率;折叠腔;连续激光

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Broadband Continuous-Wave Cavity Ring-Down Technique with Combined Cavity Configurations for High Reflectivity Measurement

GONG Yuan<sup>1,2</sup>, LI Bin-cheng<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
(<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** A simple cavity ring-down (CRD) technique based on an intensity-modulated continuous-wave (CW) diode laser is developed to determine simultaneously the reflectivities of the cavity mirror and the inserted planar mirror. The straight- and folded-cavity configurations with a same cavity length are established. Under both cavity configurations and with phase-locked technique, the amplitude and phase-shift of the first harmonic of the CRD signal are measured as a function of the modulation frequency covering an appropriate range. Effects of the system frequency response are eliminated in the data processing, and then the amplitude ratio and phase-shift difference between the two cavity configurations are fitted to an explicit theory to determine the reflectivities. The measurements are repeated with two cavity lengths, one of which is a 100 cm confocal cavity and the other a 110 cm stable cavity. The reflectivities of the cavity mirror and the inserted mirror are measured to be 99.784% and 99.668%, respectively, with an uncertainty in the order of  $10^{-5}$ .

**Key words** measurement; cavity ring-down; high reflectivity; folded cavity; continuous-wave laser

## 1 引言

高反射率光学元件在激光系统中的广泛应用迫切要求精确测量高反射率,而传统方法(如分光光度计)无法满足高反射率的测量精度要求。光腔衰荡(CRD)技术是一种高灵敏度吸收光谱技术,也被广泛用于精确测量高反射率,并可采用脉冲激光、窄谱连续激光或宽谱连续激光等多种光源。孙福革等<sup>[1]</sup>

建立的光腔衰荡法高反射率测量装置以脉冲激光系统作为光源。陈红兵等<sup>[2]</sup>对模拍效应和易亨瑜等<sup>[3]</sup>对探测器响应特性进行了分析。但脉冲激光系统造价较高,其光束质量差使得基于脉冲光源的光腔衰荡法反射率测量精度受到限制( $10^{-5}$ 量级)。本文与调幅光波法<sup>[4,5]</sup>都采用强度调制的连续激光作光源,并采用锁相方法探测光腔输出信号,但实验方案

收稿日期:2006-11-15;收到修改稿日期:2007-01-18

作者简介:龚元(1981—),男,湖北人,博士研究生,主要从事激光检测技术研究。E-mail:gongyuan3@hotmail.com

导师简介:李斌成(1966—),男,湖北人,研究员,博士生导师,主要从事光热技术和光学薄膜检测技术的研究。

E-mail:bcli@ioe.ac.cn

上存在一定区别,主要在于本方法无需腔长调制和激光稳频。

复合衰荡光腔技术,是指直腔和折叠腔相结合,以消除直腔散射、衍射等损耗,最终得到待测平面镜的反射率。盛新志等<sup>[6]</sup>用脉冲激光复合衰荡光腔技术得到待测平面镜反射率99.931%,测量精度达 $10^{-5}$ 。连续激光光腔衰荡法中必须测量系统频率响应<sup>[7]</sup>,而且由于其受多种因素影响,一般较难准确测量。本文提出的连续波复合衰荡光腔技术,用直腔和折叠腔频域测量相结合的方法,通过多参数拟合同时得到腔镜反射率和待测平面镜反射率;在数据处理中消除了系统频率响应的影响,无需测量系统频率响应曲线,减少了测量步骤,进一步提高了反射率的测量精度。

## 2 原 理

直腔连续激光光腔衰荡法原理如图1所示,采用干涉长度短的宽谱激光并离轴入射到谐振腔,使腔内的干涉效应可以忽略。理论推导用强度叠加方式,采用方波函数卷积脉冲响应<sup>[7]</sup>。



图1 直腔连续激光光腔衰荡法原理图

Fig. 1 Principle of the CW-CRD technique with a straight-cavity configuration

光腔输出信号一次谐波相对于输入方波信号一次谐波的振幅衰减和相位延迟可表示为调制角频率 $\omega$ 的函数<sup>[7]</sup>

$$\frac{A_1(\omega)}{A_0(\omega)} = \frac{a_1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}}, \quad (1)$$

$$\tan[\phi_1(\omega) - \phi_0(\omega)] = -\omega\tau_1,$$

式中 $\tau_1$ 为直腔衰荡时间;调制角频率 $\omega = 2\pi f$ ,其中 $f$ 为调制频率; $a_1$ 为直腔的振幅归一化系数; $A_1(\omega)$ , $\phi_1(\omega)$ 分别为直腔输出信号一次谐波的振幅和相位; $A_0(\omega)$ , $\phi_0(\omega)$ 分别为系统的频率响应的振幅和相位。该系统频率响应是由于函数发生器、锁相放大器和探测器等仪器的有限响应时间引起的。直腔时,由锁相放大器测量 $A_1(\omega)$ , $\phi_1(\omega)$ ,移去一块腔镜后再由锁相放大器测量对应频率时的系统频率响应 $A_0(\omega)$ , $\phi_0(\omega)$ ,再通过(1)式拟合即可得到直腔衰荡时间。不考虑吸收时,计算得到腔镜平均反射率

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = \exp(-L/c\tau_1), \quad (2)$$

其中 $c$ 为光速, $L$ 为腔长, $R_1$ , $R_2$ 分别为两腔镜的实际反射率。

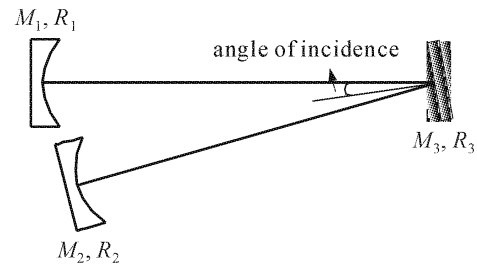


图2 折叠腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the folded-cavity configuration

保持腔长不变,插入待测平面镜构成折叠腔,如图2所示。类似于直腔,折叠腔衰荡信号振幅 $A_2(\omega)$ 和相位 $\phi_2(\omega)$ 满足

$$\frac{A_2(\omega)}{A_0(\omega)} = \frac{a_2}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}}, \quad (3)$$

$$\tan[\phi_2(\omega) - \phi_0(\omega)] = -\omega\tau_2,$$

式中 $\tau_2$ 为折叠腔衰荡时间, $a_2$ 为折叠腔的振幅归一化系数。若忽略腔内吸收,待测平面镜反射率可表示为

$$R_3 = \exp\left[\frac{L}{c}\left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}\right)\right], \quad (4)$$

由于直腔和折叠腔构型中的系统频率响应相同,其对测量的影响可由(1)和(3)式消去,得到两种腔型输出信号一次谐波对应频率时的振幅比值和相位差值表达式

$$R_A(\omega) = \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} = a \sqrt{\frac{1 + (\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2}}, \quad (5)$$

$$\Delta\phi(\omega) = \phi_2(\omega) - \phi_1(\omega) =$$

$$\arctan(\omega\tau_1) - \arctan(\omega\tau_2),$$

式中系数 $a = a_2/a_1$ ,因此实验测量 $A_1(\omega)$ , $\phi_1(\omega)$ , $A_2(\omega)$ , $\phi_2(\omega)$ 随调制角频率的变化曲线,分别由(5)式得到振幅比值和相位差值。 $R_A(\omega)$ 可由 $\omega$ 趋近于0时的振幅比值归一化,即拟合函数中取 $a = 1$ ,或者将 $a$ 也作为未知参数拟合。

在连续波复合衰荡光腔技术中,定义均方差为

$$V = \frac{\sum_{i=1}^N \left[1 - \frac{R_A^T(\omega_i)}{R_A^E(\omega_i)}\right]^2}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N [\Delta\phi^E(\omega_i) - \Delta\phi^T(\omega_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [\Delta\phi^E(\omega_i)]^2}, \quad (6)$$

其中 $\omega_i$ 为一系列分离的调制角频率, $R_A^E(\omega_i)$ , $\Delta\phi^E(\omega_i)$ 分别为实验振幅比值和相位差值。 $R_A^T(\omega_i)$ ,

$\Delta\phi^T(\omega_i)$  分别为理论振幅比值和相位差值, 由(5)式求得。采用单纯形法<sup>[8]</sup>优化各个参数(衰荡时间  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  和系数  $a$ ), 使均方差最小, 方差最小时即可确定直腔和折叠腔衰荡时间  $\tau_1, \tau_2$ , 进而通过(2), (4)式求得腔镜和待测平面镜的反射率  $R, R_3$ 。

### 3 实验结果及讨论

实验装置在文献[7]中已有详细叙述。所用锁相放大器(Signal Recovery, Model 7280)频率范围 0.5 Hz~2.0 MHz, 幅值灵敏度可达 10 nV, 相位噪声小于  $0.0001^\circ$  均方根。激光离轴入射<sup>[9]</sup>到谐振腔, 调节腔镜使得经过  $N$  次反射后光路重合, 等效于腔长为  $NL$  的情况。由 830 nm 半导体激光器有源层折射率  $n = 3.3$  得到端面反射率约为 29%, 再由  $\Delta\nu = c(1-R)/4\pi nd\sqrt{R}$  可得激光二极管(LD)单个纵模的半峰全宽(FWHM)为 38.2 GHz, 则 830 nm 激光各个纵模的相干长度约 8 mm, 远小于等效腔长  $NL$ , 因此干涉效应可以忽略。

分别对腔长 100 cm 的共焦腔和 110 cm 的稳定腔进行了直腔和折叠腔实验, 折叠腔入射角小于  $5^\circ$ 。直腔和折叠腔衰荡信号一次谐波的振幅比值和

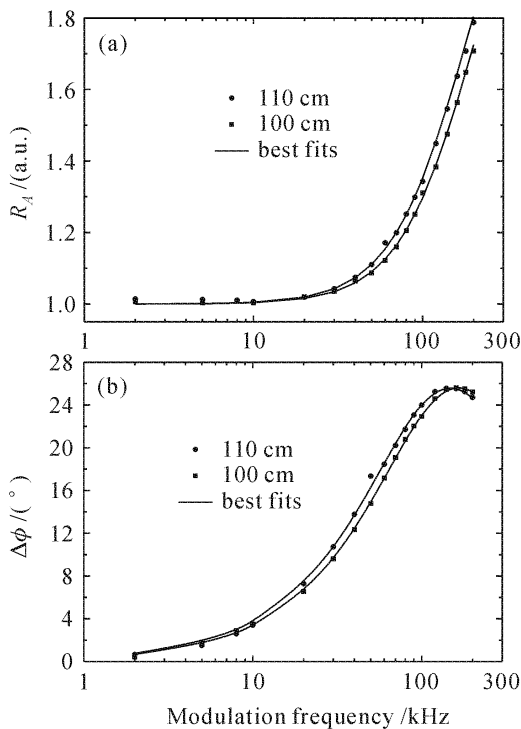


图3 直腔和折叠腔衰荡信号一次谐波的振幅比值(a)和相位差值(b)随调制频率的变化曲线

Fig. 3 Amplitude ratio (a) and phase-shift difference (b) of the first harmonic of the CW-CRD signal between the straight- and the folded-cavity configurations versus modulation frequency

相位差值随调制频率的变化曲线如图 3 所示, 点为实验数据, 实线为最佳拟合曲线。实验中, 振幅比值在调制频率 10 kHz 以下时几乎不变, 所以图 3(a)中振幅比值由低频理论值归一化表示。与直腔相比, 由于插入了待测平面镜, 折叠腔的单程损耗增大, 衰荡时间  $\tau_2 < \tau_1$ 。由于相位延迟为负, 所以图 3(b)中, 相位差值为正。实验与理论高度一致说明了理论推导的合理性。

用 100 cm 共焦腔实验数据(直腔和折叠腔)分析了拟合直腔衰荡时间  $\tau_1$  和折叠腔衰荡时间  $\tau_2$  的唯一性。如图 4 所示,  $\tau_1$  在偏离其最优值  $\pm 5\%$  范围内变化, 将  $\tau_2$  和振幅系数  $a$  作为自由参量拟合得到一系列均方差最小值, 即得到  $\tau_1$  偏离最优值对均方差的影响, 同理得到  $\tau_2$  对均方差的影响。从图 4 可以看出, 当  $\tau_1$  和  $\tau_2$  变化  $\pm 1\%$  时, 均方差分别增加 23% 和 13%。均方差对  $\tau_1$  和  $\tau_2$  偏离最优值的变化非常敏感, 因此两者可唯一确定。

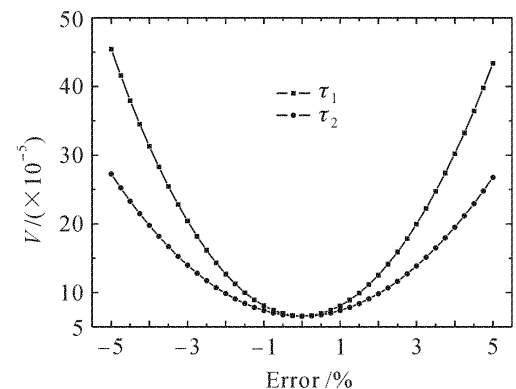


图4 均方差对直腔衰荡时间和折叠腔衰荡时间的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity of mean square variance to straight-cavity decay time and folded-cavity decay time

在腔长 100 cm 和 110 cm 时, 按上述方法拟合得到的结果如表 1 所示。另一方面, 测量系统频率响应并分别通过(1)和(3)式消除其影响, 然后分别对直腔和折叠腔的实验数据拟合得到  $\tau_1$  和  $\tau_2$ , 再计算腔镜反射率  $R$  和待测镜反射率  $R_3$ , 结果见表 1。这两种方法得到的腔镜和待测镜反射率结果高度一致。最终确定腔镜反射率  $R = 99.784\%$ , 待测镜反射率  $R_3 = 99.668\%$ , 统计测量精度分别为  $2 \times 10^{-5}$  量级和  $6 \times 10^{-5}$  量级。

由于相同腔长时的重复性测量误差比不同腔长时的测量误差小, 在此仅分析了不同腔长以及不同方法时的测量误差, 未讨论相同实验条件下同一种方法的重复性精度。

表 1 拟合结果

Table 1 Results obtained by the fitting method

$L/cm$	$\tau_1/\mu s$	$\tau_2/\mu s$	$V$	$R/\%$	$R_3/\%$
100	1.532	0.606	$6.6 \times 10^{-5}$	99.782	99.668
110	1.716	0.679	$3.2 \times 10^{-4}$	99.786	99.674
100*	1.541	0.607	—	99.784	99.668
110*	1.695	0.661	—	99.784	99.662

\* Represents the system frequency responses are eliminated.

对于高反射率测量,腔镜反射率相对误差

$$\left| \frac{\Delta R}{R} \right| = (1 - R) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_1}{\tau_1} \right| \right), \quad (7)$$

由(7)式可知,腔镜反射率越高,其测量误差越小。

待测镜反射率相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R_3}{R_3} \right| = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + (1 - RR_3) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_2}{\tau_2} \right| \right), \quad (8)$$

由(8)式可以看出,待测平面镜反射率测量误差大于腔镜反射率测量误差。若待测镜实际反射率越高,其测量误差越小,但也依赖于腔镜反射率。因此要减小待测平面镜的测量误差,必须使用高反射率的腔镜。根据图4的灵敏度分析,估计 $\tau_1$ 和 $\tau_2$ 的确定误差分别为0.7%和1.0%,忽略腔长测量误差时由(7)和(8)式得到 $R$ 和 $R_3$ 的测量精度分别为 $2 \times 10^{-5}$ 和 $7 \times 10^{-5}$ ,与统计结果一致。

## 4 结 论

提出了一种基于宽谱半导体激光器的连续波复合衰荡光腔技术,具有高精度、低成本的特点。用直腔和折叠腔测量相结合的方法,由两种腔型光腔衰荡信号一次谐波的振幅比值和相位差值构造误差函数,拟合得到直腔衰荡时间和折叠腔衰荡时间,从而确定腔镜反射率和待测镜反射率。该方法可同时得到腔镜和待测镜反射率,提高了测量效率。在数据处理中消除了系统频率响应,减少了测量步骤,避免了由此引入的测量误差。采用该方法测得腔镜反射率为99.784%,待测平面镜反射率为99.668%,相对测量精度达到 $10^{-5}$ 量级。另一方面,测量并直接消

除系统响应,然后分别拟合直腔衰荡时间和折叠腔衰荡时间,两种方法得到的结果高度一致。若采用更高反射率的腔镜,测量精度可进一步得到提高。

## 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Chen Hongbing, Gao Junyi, Zhou Jingang *et al.*. Experimental study on the complicated mode beating effects of ring-down cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7):948~952  
陈红兵,高军毅,周金刚等.衰荡腔复杂模拍效应的实验研究[J].*光学学报*,1999,**19**(7):948~952
- 3 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai *et al.*. Influence of detector responsibility on its metrical result of ring-down cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):997~1000  
易亨瑜,吕百达,张凯等.探测器响应特性对光腔衰荡法测量结果的影响[J].*中国激光*,2005,**32**(7):997~1000
- 4 Liang Yonghui. Determining the total loss of a passive resonant cavity by amplitude-modulated light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(5):423~426  
梁永辉.采用调幅光波测量无源谐振腔的损耗[J].*中国激光*,2000,**A27**(5):423~426
- 5 Liang Yonghui, Hu Shaomin. Determining the total loss of a passive resonant cavity by amplitude-modulated light [J]. *Appl. Laser*, 2000, **20**(5):219~220  
梁永辉,胡绍民.采用调幅光波测量无源谐振腔的损耗[J].*应用激光*,2000,**20**(5):219~220
- 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 Gong Yuan, Li Bincheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1247~1250  
龚元,李斌成.连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率研究[J].*中国激光*,2006,**33**(9):1247~1250
- 8 W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling *et al.*. *Fu Zuyun, Zhao Meina, Ding Yanshi et al. trans. Numerical Recipes in C; The Art of Scientific Computing [M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 313~316*  
W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling 等著,傅祖芸,赵梅娜,丁岩石等译. C 数值算法[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2004. 313~316
- 9 J. B. Paul, L. Lapson, J. G. Anderson. Ultrasensitive absorption spectroscopy with a high-finesse optical cavity and off-axis alignment [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(27):4904~4910