

# 光腔衰荡高反射率测量技术综述

李斌成<sup>1</sup> 龚元<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup>电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 610054

**摘要** 综述了光腔衰荡高反射率测量技术的发展历史和国内外最新研究进展, 给出了各种光腔衰荡技术的原理, 分析了相应的优缺点以及用于高反射率测量的现状。主要包括脉冲光腔衰荡、相移光腔衰荡、窄谱连续光腔衰荡和自混合光腔衰荡技术。

**关键词** 测量; 光腔衰荡; 高反射率; 脉冲激光; 相移; 光反馈

中图分类号 TN247 OCIS 120.2230 140.4780 文献标识码 A

## Review of Cavity Ring-Down Techniques for High Reflectivity Measurements

Li Bincheng<sup>1</sup> Gong Yuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Beam Control, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup>School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

**Abstract** A review of cavity ring-down (CRD) techniques, including pulsed-CRD, phase-shift CRD, narrow-band continuous-wave CRD, and optical feedback CRD, for accurate high reflectivity measurements is presented. Corresponding principles, advantages and disadvantages are described in detail.

**Key words** measurement; cavity ring-down; high reflectivity; pulsed laser; phase shift; optical feedback

### 1 引言

光腔衰荡(CRD)技术是一种基于高精度谐振腔的高灵敏度探测技术, 已广泛用于气体吸收光谱测量<sup>[1]</sup>。该技术通过光学谐振腔使待测气体的吸收程大大增加, 从而高精度测量气体浓度等信息。它是一种绝对测量方法, 不需要标定。CRD 测量灵敏度高, 装置简单, 不受激光输出功率波动的影响, 相对于传统测量方法具有无可比拟的优势和广泛的应用领域。目前已有多篇关于 CRD 的综述文章<sup>[1~3]</sup>, 但重点一般在光谱分析方面。本文以 CRD 在高反射率测量方面的应用为主线, 综述了 CRD 的发展历史和国内外最新研究进展。

### 2 光腔衰荡高反射率测量技术

低损耗、高反射率( $R>99.9\%$ )反射镜在引力波观测、激光陀螺、高灵敏激光光谱、高功率激光器和激光

收稿日期: 2009-04-08; 收到修改稿日期: 2009-06-23

作者简介: 李斌成(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光热技术、光学薄膜检测技术和深紫外薄膜技术等方面的研究。E-mail: bcli@ioe.ac.cn

系统等方面有着至关重要的作用<sup>[4~6]</sup>。国外有报道的最高反射率已高达 99.99984%<sup>[7]</sup>，国内在某些特殊波长可镀制的高反镜反射率可达 99.995% 以上。随着高反射膜镀制技术的发展和高反镜的广泛应用，精确测量高反镜的反射率显得特别重要。从国内外研究现状看，目前能精确测量反射率高于 99.99% 的唯一方法是光腔衰荡技术。光腔衰荡技术通过测量光在谐振腔中的衰荡时间来确定腔的损耗或者待测镜的反射率。为了测量待测平面镜的反射率，一般采用直腔和折叠腔相结合的方法。该技术最早于 1977 年由 V. Sanders<sup>[8]</sup> 提出。目前已有多种类型的 CRD 用于测量高反射率，例如脉冲光腔衰荡技术(Pulsed-CRD)、窄谱连续波光腔衰荡技术(NBCW-CRD)、相移光腔衰荡技术(PS-CRD)和自混合光腔衰荡技术(OF-CRD)等。

## 2.1 Pulsed-CRD 高反射率测量技术

### 2.1.1 Pulsed-CRD 原理

典型的 Pulsed-CRD 实验装置如图 1 所示，由脉冲激光器、模式匹配光学系统、光学谐振腔、会聚透镜和光电探测器构成。若采用 CRD 测量非可见波长腔镜的反射率，为了精确调节腔镜，一般引入可见激光(如 633 nm He-Ne 激光)作为准直光。目前 Pulsed-CRD 中使用的脉冲激光器输出脉宽一般为纳秒量级。

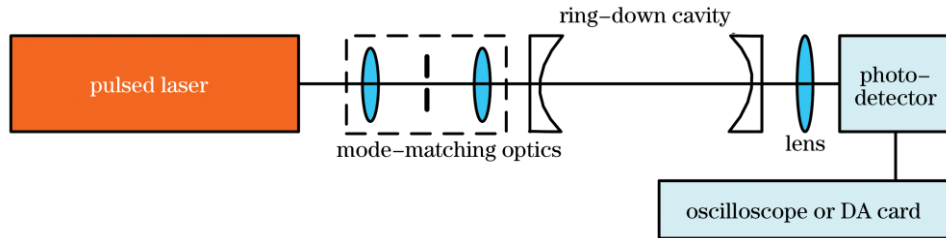


图 1 Pulsed-CRD 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulsed cavity ring-down experimental setup

在 Pulsed-CRD 实验中，当激光脉冲进入衰荡腔后，光腔输出信号可表示为

$$I(t) = I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad (1)$$

式中  $\tau$  为衰荡时间，可表示为

$$\tau = \frac{nL}{c(\alpha L - \ln R)}, \quad (2)$$

式中  $c$  为光速， $L$  为腔长， $n$  为腔内介质的折射率， $\alpha$  为腔内吸收系数。当腔内介质为空气时，折射率  $n$  近似为 1。若腔内无吸收介质， $\alpha=0$ ，则可以根据衰荡时间计算得到腔镜平均反射率

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = 1 - \frac{L}{c\tau}. \quad (3)$$

实验中，首先用图 1 所示的装置测量直腔衰荡信号。当入射激光与衰荡腔模式匹配，且激光脉冲较短时，衰荡信号呈单指数衰减，如图 2 所示。测得的衰荡信号按单指数衰减函数拟合，即可得到衰荡时间。为了测量待测平面镜的反射率，通常在图 1 的直腔中插入待测镜，构成折叠腔，如图 3 所示。折叠腔的衰荡信号如图 2 所示。分别测量直腔和折叠腔信号并拟合得到相应的衰荡时间  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ，可计算得到待测镜的反射率为

$$R_3 = \exp\left(\frac{L}{c\tau_1} - \frac{L}{c\tau_2}\right). \quad (4)$$

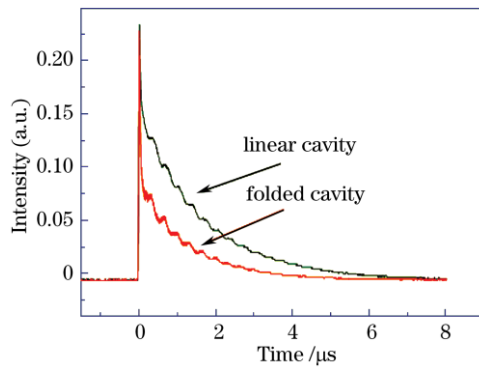


图 2 直腔和折叠腔的 Pulsed-CRD 信号  
Fig.2 Pulsed-CRD signals obtained with linear cavity and folded cavity

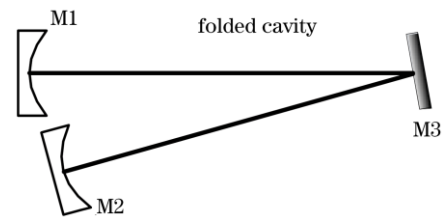


图 3 折叠腔示意图  
Fig.3 Schematic of folded cavity

### 2.1.2 Pulsed-CRD 的特点

Pulsed-CRD 的优点是装置简单、物理模型直观。另外, Pulsed-CRD 与光参量振荡器(OPO)结合,可以在宽谱范围内研究物质的吸收谱。它的缺点是成本较高、检测精度较低。脉冲激光器的光束质量一般较差,因此激光束与衰荡腔之间的模式匹配比较困难,限制了测量精度。国内报道的采用 Pulsed-CRD 技术测量高反射率的精度一般在  $10^{-5}$  左右。

### 2.1.3 Pulsed-CRD 国内外研究现状

国内测量高反射率主要采用 Pulsed-CRD 技术。1994 年清华大学精仪系在国内最早进行光腔衰荡技术研究,采用 Pulsed-CRD 测量高反射率<sup>[9]</sup>。中国科学院大连化学物理研究所采用 Pulsed-CRD 对氧碘化学激光器腔镜高反射率进行了细致的研究<sup>[10~14]</sup>,高反射率测量精度达  $10^{-5}$ ,并采用直腔和折叠腔相结合的方法测量了待测平面镜的反射率<sup>[11]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所和武汉物理与数学研究所合作,采用脉冲激光器作光源,在高反射率测量和吸收光谱测量方面都进行了研究,反射率测量精度达到  $10^{-5}$  量级<sup>[15,16]</sup>,并提出了四腔镜法建立多个方程,同时测量腔镜反射率和腔内吸收<sup>[17]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所还对脉冲激光激励时衰荡腔内的复杂模拍效应进行了研究<sup>[18]</sup>。中国工程物理研究院应用电子学研究所易亨瑜等<sup>[19~21]</sup>分析了 Pulsed-CRD 中,腔长失调、探测器响应等因素对反射率测量精度的影响,并研制了大口径光学元件反射率的镜面扫描精密测量系统<sup>[22]</sup>。中国科学院光电技术研究所也建立了 Pulsed-CRD 装置<sup>[23]</sup>,并提出了在模式失配情况下得到准确测量结果的方法<sup>[24]</sup>,实验装置如图 4 所示。该研究小组还于 2008 年报道了将其用于测量中红外波长高反镜高反射率的相关结果<sup>[25]</sup>。四川大学与光电所合作,在脉冲光腔衰荡平台上开展了高反射率测量可靠性方面的研究工作<sup>[26]</sup>。近期,同济大学、西北工业大学和西北大学等单位也加入到了 Pulsed-CRD 的高反射率测量研究中<sup>[27,28]</sup>。



图 4 脉冲光腔衰荡高反射率测量实验装置照片  
Fig.4 Experimental setup of pulsed-CRD for high reflectivity measurements

虽然 Pulsed-CRD 技术的广泛研究源于 1988 年 A. O'Keefe 等的研究<sup>[29]</sup>,但在国外 Pulsed-CRD 通常用于研究气体吸收光谱<sup>[30]</sup>。除了少量会议文章外<sup>[31]</sup>,国外很少见到 Pulsed-CRD 用于测量高反射率的报道,

其原因可能是因为 Pulsed-CRD 成本高、反射率测量精度较低。

## 2.2 NBCW-CRD 高反射率测量技术

### 2.2.1 NBCW-CRD 原理

NBCW-CRD 与 Pulsed-CRD 一样,也是通过测量单指数衰减信号并拟合得到衰荡时间,进而计算得到腔镜或待测镜的反射率。两者的主要区别在于得到单指数衰减信号的途径不同。NBCW-CRD 采用连续激光作光源,并且要求连续激光的谱宽很窄。通过某些方法使激光光谱与衰荡腔的本征纵模共振,从而大大提高衰荡腔的输出信号振幅。当振幅超过某一阈值时,触发关闭激光束,得到指数衰减信号。实验上一般采用激光波长调谐、衰荡腔腔长调制等方法<sup>[32~34]</sup>,改变激光波长与衰荡腔纵模的相对位置,如图 5 所示,使激光光谱与衰荡腔纵模共振。图 5 中  $u_{\text{las}}$  和  $u_{\text{mode}}$  分别表示激光波长和衰荡腔纵模的调谐速度,横坐标表示光频率。

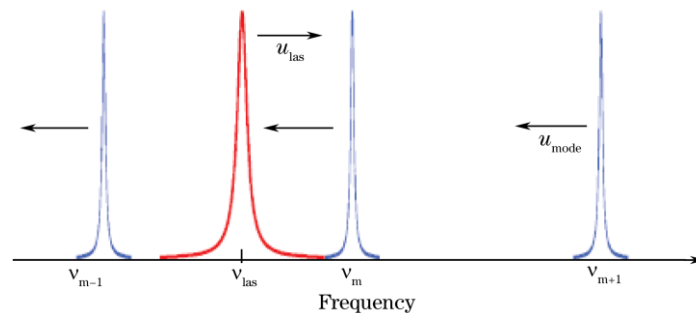


图 5 激光波长与衰荡腔纵模的相对位置调节  
Fig.5 Principle of NBCW-CRD

基于衰荡腔腔长调制的 NBCW-CRD 实验装置一般如图 6 所示。函数发生器产生的周期信号(如三角波)经放大后用于驱动固定在后腔镜上的压电陶瓷(PZT),使衰荡腔腔长产生微小的周期性变化。腔长发生变化时,衰荡腔纵模的位置会发生变化,从而使窄谱连续激光与单个衰荡腔纵模发生共振,大大增强衰荡腔输出信号。当输出信号振幅大于某一阈值时,触发关闭入射激光束,示波器或数据采集卡记录关闭激光束后的指数衰减曲线,根据单指数衰减拟合得到衰荡时间,并计算得到腔镜或待测平面镜的反射率。

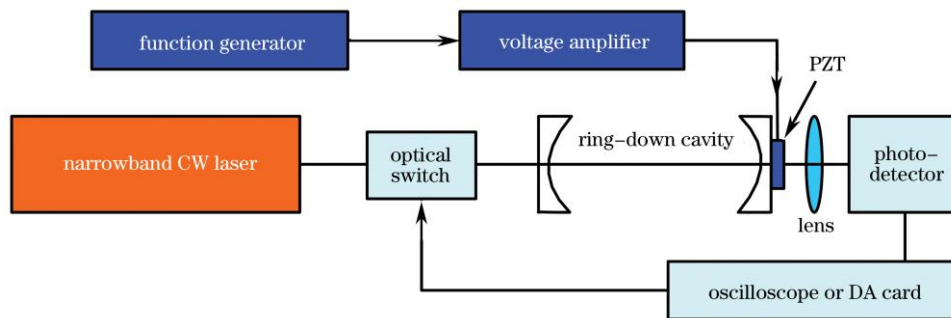


图 6 NBCW-CRD 高反射率测量装置示意图  
Fig.6 Schematic diagram of experimental setup of NBCW-CRD for high reflectivity measurements

### 2.2.2 NBCW-CRD 的特点

NBCW-CRD 有信号信噪比高、反射率测量精度高等优点。光源可以采用半导体激光器。相比于脉冲激光器,光源部分的成本有所降低,但由于该技术要求激光线宽窄,所以一般采用分布反馈式(DFB)半导体激光器。采用半导体激光器作光源,可以大大减小系统的尺寸,便于集成。该技术的主要缺点是系统比较复杂: 1) 由于需要调谐激光波长或调制腔长,因此在激光腔或衰荡腔镜上通常采用 PZT; 2) 当信号振幅超过阈值时,需要快速关断激光束。一般采用外调制器或直接调制激光器的激励电流,同时通过反馈电路实时比较信号振幅和阈值的大小,并控制调制器关断激光束。

### 2.2.3 NBCW-CRD 国内外研究现状

D. Z. Anderson等<sup>[35]</sup>最早采用NBCW-CRD测量衰荡时间。1984年Anderson等建立了基于阈值触发方式的测量装置,对衰荡腔损耗的测量精度可达 $5 \times 10^{-6}$ 。他们利用窄谱激光与衰荡腔纵模之间的随机耦合,得到较大振幅的衰荡腔输出信号。当光腔输出信号大于阈值时,通过触发电路控制光开关快速关断激光束,从而得到指数衰减信号。1992年G. Rempe等<sup>[36]</sup>采用声光调制器实现光开关和光隔离器的双重功能,并采用PZT调制腔长,使激光频率与衰荡腔模更容易发生共振,在850 nm波长测得反射率结果99.99984%,测量误差小于 $10^{-6}$ 。

类似于NBCW-CRD,山西大学李利平等<sup>[37]</sup>利用不同扫描速度下的光腔衰荡信号,根据相邻振荡峰的时间间隔和振幅大小,得到了光腔衰荡时间。测得腔镜反射率为 $(99.99852 \pm 0.00006)\%$ ,这是国内报道所测得的最高反射率。他们采用Electronic-Optics公司的高反镜(标称透射率为 $8 \times 10^{-6}$ ),反射率非常高,因此能达到约 $10^{-6}$ 的测量精度。由于在光腔衰荡技术中,腔镜反射率越高,其测量精度越高。若该技术将直腔和折叠腔相结合,就能高精度测量待测平面镜的高反射率。

## 2.3 PS-CRD 高反射率测量技术

### 2.3.1 PS-CRD 原理

PS-CRD 技术采用方波调制激光光强,激光束耦合进衰荡腔并在腔内多次来回反射,光腔输出信号相对于输入信号有相位延迟。基本原理如图7所示。

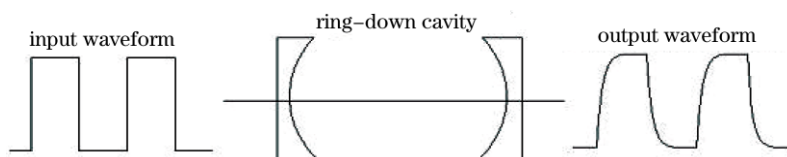


图7 相移光腔衰荡技术基本原理  
Fig.7 Principle of PS-CRD

衰荡时间为

$$\tau = -\frac{1}{\omega} \tan \phi, \quad (5)$$

式中 $\omega$ 为调制角频率, $\phi$ 为调制光信号通过衰荡腔的相位延迟量。由锁相方式测量相位延迟,按(5)式计算得到衰荡时间,再按(3),(4)式计算得到腔镜和待测镜反射率。中国科学院光电技术研究所<sup>[38~41]</sup>和国防科技大学<sup>[42,43]</sup>将PS-CRD技术扩展到同时采用振幅和相位信息来确定衰荡时间。

PS-CRD 技术测量高反射率的典型装置如图8所示。函数发生器输出的方波信号一路调制半导体激光器的激励电流或电压,另一路作为参考信号输入到锁相放大器。振幅被方波调制的激光束耦合进衰荡腔。由于腔镜的反射率很高,激光束在腔内来回反射很多次。输出光会聚后由光电探测器转换成电信号后输入到锁相放大器。光腔输出信号相对于入射信号有振幅衰减和相位延迟。由锁相放大器测量振幅衰减和相位延迟随调制频率的变化曲线,可以拟合得到衰荡时间,从而进一步可以测量腔镜和待测镜的高反射率。在图8所示的装置中,一般采用离轴入射,避免腔镜的反射光回到激光腔,影响半导体激光器的输出功率和光谱。

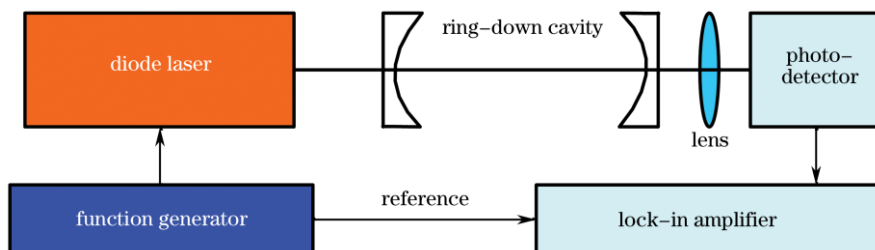


图8 相移光腔衰荡技术测量高反射率的典型装置  
Fig.8 Schematic diagram of PS-CRD for high reflectivity measurements

### 2.3.2 PS-CRD 的特点

PS-CRD 采用半导体激光器作光源, 成本大大降低。采用宽谱半导体激光器<sup>[38]</sup>或离轴入射的窄谱激光<sup>[44]</sup>时, 激光功率到衰荡腔的耦合效率不高, 对超高反射率的测量存在一定限制。也可以采用稳频方法使激光波长与衰荡腔锁定<sup>[45]</sup>, 在保证功率稳定性的前提下使耦合效率大大提高, 但相应的实验装置比较复杂。

### 2.3.3 PS-CRD 国内外研究现状

1980 年 J. M. Herbelin 等<sup>[46]</sup>报道的相关工作是 PS-CRD 技术的基础。他们采用 He-Ne 激光作光源, 由于激光线宽很窄, 利用腔镜的随机机械振动等因素使激光谱与衰荡腔模产生随机的共振, 将激光功率耦合进衰荡腔。因此, 衰荡信号中存在较大的振幅波动, 导致锁相信号噪声较大, 高反射率测量精度不高(约  $10^{-4}$ )。为了解决窄谱激光到衰荡腔的随机耦合问题, R. Engeln 等<sup>[44]</sup>将窄谱激光束离轴入射到衰荡腔, 使激光在腔内来回多次反射后重合, 等价于采用腔长更长的衰荡腔, 从而减小衰荡腔的自由光谱范围(FSR), 激发衰荡腔的准连续模式, 实现激光功率到衰荡腔的稳定耦合。采用振幅调制的激光束入射进衰荡腔, 由锁相方法探测衰荡腔输出信号相对于入射光的相移, 可以得到衰荡时间。1995 年 N. Uehara 等<sup>[45]</sup>采用 Pound-Drever-Hall 稳频技术使激光频率与衰荡腔模锁定, 采用两种方法确定衰荡时间, 在 1064 nm 波长附近测得反射率( $99.8595 \pm 0.0033$ )%。一是在时域探测指数衰减信号, 拟合确定衰荡时间; 二是通过记录频域响应函数, 拟合得到截止频率和衰荡时间。

2000 年国防科技大学采用小抖动稳频技术, 使激光频率锁定在衰荡腔的某一谐振频率, 同时调制激光光强, 并采用锁相方式探测振幅和相位随调制频率的变化曲线, 拟合得到衰荡时间, 从而确定衰荡腔的损耗<sup>[42,43,47]</sup>。激光频率与衰荡腔纵模锁定的方法大大提高了激光功率到衰荡腔的耦合效率和衰荡信号的信噪比, 从而实现高精度测量高反射率, 但稳频技术使测量系统变得复杂, 也增加了系统的控制成本。中国科学院光电技术研究所近期提出了基于宽谱半导体激光器的 PS-CRD 技术用于精确测量高反射率<sup>[38-41]</sup>。与窄谱激光相比, 宽谱激光不需稳频或离轴入射即可激发衰荡腔的多个本征纵模, 确保激光稳定地耦合进光腔, 并连续输出。采用锁相方式探测振幅和相位随调制频率的变化曲线, 拟合得到衰荡时间<sup>[38]</sup>。采用直腔和折叠腔相结合的方式, 可精确测量高反射平面镜的反射率<sup>[39]</sup>。由于宽谱激光到衰荡腔的耦合效率较低, 因此, 当衰荡腔镜的反射率非常高且输入激光功率较低时, 衰荡信号信噪比较低, 限制了高反射率的测量精度。

## 2.4 OF-CRD 高反射率测量技术

### 2.4.1 OF-CRD 原理

最近, 基于半导体激光器的自混合效应<sup>[48]</sup>, 我们提出 OF-CRD 技术, 并用于精确测量高反射率<sup>[49]</sup>, 实验装置如图 9 所示。

半导体激光器的自混合效应, 又叫光反馈效应。由于半导体激光器一般采用激光工作物质的解理面作为反射面, 端面反射率较低, 这就决定了它的输出特性将受到后向反馈光的影响。OF-CRD 技术利用衰荡腔将半导体激光器发出的光部分反射回半导体激光器的谐振腔, 对半导体激光器的输出光谱产生影响。通过控制后向反馈光光强微调半导体激光器的输出光谱, 可以使激光到衰荡腔的耦合效率提高 2 个数量级左右<sup>[49]</sup>, 在光腔输出信号中产生振幅非常高的共振峰, 如图 10 所示。共振峰出现的频率与腔镜的反射率有关, 随反射率的增加而减少。当衰荡信号的振幅大于阈值时, 触发关闭激光束, 或者选择在共振峰出现的时刻关闭激光束, 同时记录指数衰减信号, 拟合得到衰荡时间, 并计算得到腔镜反射率。

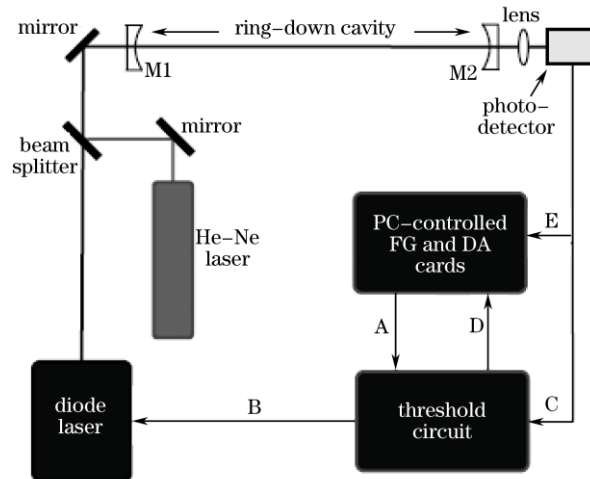
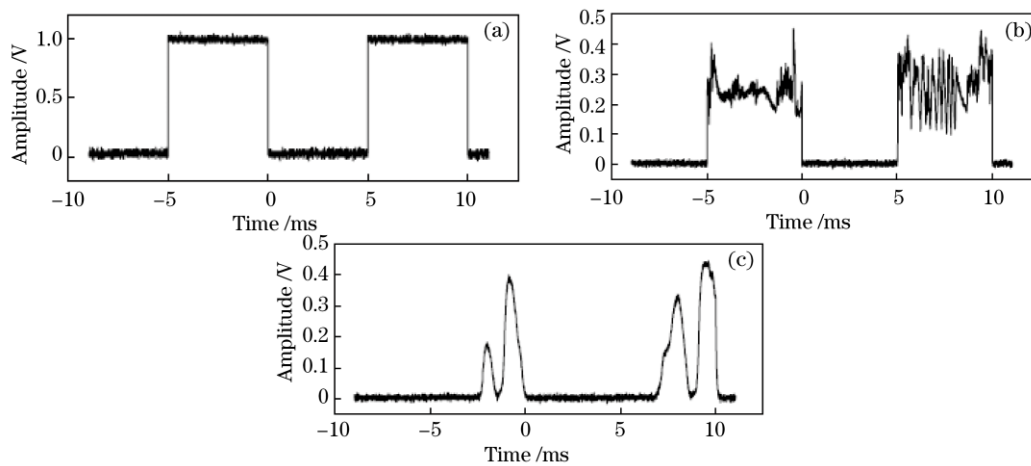


图 9 自混合光腔衰荡技术测量高反射率的实验装置

Fig.9 Schematic diagram of OF-CRD for high reflectivity measurements

图 10 (a)激光器方波调制信号；(b)和(c)腔镜反射率  $R \approx 99.8\%$  和  $99.996\%$  时光腔衰荡信号中的共振峰Fig.10 Square-wave modulated laser output (a) and resonant peaks obtained with cavity mirrors with reflectivity of  $R \approx 99.8\%$  (b),  $R \approx 99.996\%$  (c)

#### 2.4.2 OF-CRD 的特点

OF-CRD 技术具有低成本、高精度、易控制等优点。该技术基于半导体激光器，对激光器的输出光谱无特殊技术要求，激光器输出功率仅需达到毫瓦量级即可，因此成本很低。而且由于半导体激光器波长覆盖范围广，本技术很容易移植到其他激光波长。

#### 2.4.3 OF-CRD 国内外研究现状

2002年J. Morville等<sup>[50]</sup>将半导体激光器的光反馈效应和光腔衰荡技术相结合，用于衡量气体检测和光谱分析。他们采用窄谱可调半导体激光器(如外腔二极管激光器或DFB)<sup>[51]</sup>，来获得高光谱分辨率。同时，采用PZT控制反馈光的相位，从而使激光频率与衰荡腔纵模共振<sup>[51,52]</sup>。2008年，我们提出了自混合光腔衰荡技术用于测量高反射率<sup>[49]</sup>，并分析了仪器响应时间对衰荡时间测量的影响<sup>[53]</sup>。该技术采用宽谱(F-P型)半导体激光器作光源，降低了成本，并简化了实验装置。通过实验比较了Pulsed-CRD技术、PS-CRD技术和OF-CRD技术，对同一对腔镜，不同光腔衰荡技术的测量结果非常一致<sup>[54,55]</sup>。另外，对一对反射率约为99.996%的腔镜(美国Los Gatos Research公司)进行了重复性实验，测量重复性误差仅为0.00003%，结果如图11所示。

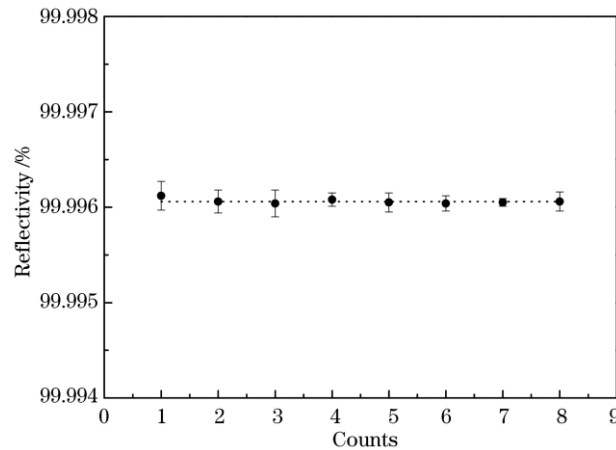


图 11 反射率测量重复性测试结果  
Fig.11 Reproducibility of ultra-high reflectivity measurements

### 3 结 论

与传统的反射率测量技术相比,光腔衰荡高反射率测量技术的主要优点是测量精度高。由于反射率测量通过测量腔内光强的衰减时间实现,不受光强漂移的影响,有效提高了测量精度。在直腔结构时,腔镜反射率的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R}{R} \right| = (1 - R) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_1}{\tau_1} \right| \right), \quad (6)$$

由(6)式可知,腔镜反射率测量误差与腔长测量误差、衰荡时间测量误差和腔镜反射率本身有关。腔镜反射率越高,其测量误差越小。对于反射率高于 99.99% 的腔镜,只要腔长和衰荡时间的组合测量误差低于 1%,反射率测量误差即可达到  $10^{-6}$ 。而在折叠腔结构时,待测平面镜反射率的相对误差为

$$\left| \frac{\Delta R_3}{R_3} \right| = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + (1 - RR_3) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_2}{\tau_2} \right| \right), \quad (7)$$

由(7)式可以看出,待测平面镜实际反射率越高,其测量误差越小,但也依赖于腔镜反射率。因此使用高反射率腔镜可以有效提高平面镜反射率测量精度。

经过多年的努力,国内在光腔衰荡技术测量高反射率方面已经接近国际先进水平,目前无论在测量方法的种类、测量精度等参数方面都有较大的突破。这些光腔衰荡技术各具特点: Pulsed-CRD 技术成本高,测量精度受限于光束质量和模拍效应;宽谱 PS-CRD 技术中激光束到衰荡腔的耦合效率低、测量精度有限;窄谱 PS-CRD 技术中的稳频技术致使实验装置复杂; NBCW-CRD 技术中需要调谐激光波长或衰荡腔长,测量精度高,但成本较高、控制复杂; OF-CRD 技术具有低成本、超高精度等优点。目前 OF-CRD 技术已实现仪器化,在 1064 nm 波长的测量精度优于 0.0001%。由于采用半导体激光器作光源,该技术可以方便地应用到其他波长。OF-CRD 技术已基本满足了国内对超高反射率测量的重要需求。

### 参 考 文 献

- 1 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications[J]. *Int. Rev. Phys. Chem.*, 2000, **19**(4): 565~607
- 2 B. A. Paldus, A. A. Kachanov. An historical overview of cavity-enhanced methods[J]. *Can. J. Phys.*, 2003, **83**(10): 975~999
- 3 A. O'Keefe, J. J. Scherer, J. B. Paul *et al.*. Cavity-ringdown laser spectroscopy history, development, and applications[J]. *ACS Symp. Ser.*, 1999, **720**: 71~92



- 4 A. Abramovici, W. E. Althouse, R.W. P. Drever *et al.*. LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory[J]. *Science*, 1992, **256**(5055): 325~333
- 5 W. W. Chow, J. Gea-Banacloche, L. M. Pedrotti *et al.*. The ring laser gyro[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1): 61~104
- 6 Ren Guoguang, Huang Yunian. The present status and future of the tactical laser weapons[J]. *Laser & Infrared*, 2002, **32**(4): 211~217  
任国光, 黄裕年. 战术高能激光武器的发展现状和未来[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(4): 211~217
- 7 G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 363~365
- 8 V. Sanders. High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(1): 19~20
- 9 Hu Xiaodong, Zhou Jiulin. Optimization of cavity parameters in the reflectivity measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2): 173~178  
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
- 10 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镜的反射率[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1): 35~38
- 11 Sheng Xinzhi, Sun Fuge, Bai Jiling *et al.*. Precise measurement of COIL mirrors 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
- 12 Liu Yan, Jin Yuqi, Sang Fentin *et al.*. Measure and research of mirrors disalignment for COIL resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 221~224  
刘岩, 金玉奇, 桑凤亭 等. 氧碘化学激光器谐振腔腔镜失调测量与研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 221~224
- 13 Sheng Xinzhi, Sun Fuge, Gu Yukun *et al.*. Precise measurement of plane COIL mirror reflectivity[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1999, **16**(1): 64~69  
盛新志, 孙福革, 顾玉昆 等. 平面 COIL 腔镜高反射率的精确检测[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(1): 64~69
- 14 Zhao Weili, Fang Benjie, Wang Feng *et al.*. Experimental study of parameters of COIL mirror's film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(12): 1979~1982  
赵伟力, 房本杰, 王锋 等. COIL 腔镜薄膜参数实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(12): 1979~1982
- 15 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
- 16 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Cao Junwen *et al.*. Measurement of the transition of barium  ${}^6s^6p^1P_1 \leftarrow {}^6s^6s^1S_0$  using cavity ringdown spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(7): 1274~1278  
赵宏太, 柳晓军, 曹俊文 等. Ba 原子  ${}^6s^6p^1P_1 \leftarrow {}^6s^6s^1S_0$  跃迁的光腔衰荡光谱[J]. *物理学报*, 2001, **50**(7): 1274~1278
- 17 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Zhan Mingsheng. Measurement of four cavity mirrors reflectivity and absorption of the cavity with cavity ringdown spectroscopy[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
- 18 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
- 19 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
- 20 Yi Hengyu, Lü Baida, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment on metrical precision by cavity ring-down method [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法测量精度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(8): 993~996
- 21 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai *et al.*. Choosing cavity parameters in cavity ring-down method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(4): 523~527  
易亨瑜, 吕百达, 张凯 等. 衰荡腔测量中的腔参数选择[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(4): 523~527

- 22 Yi Hengyu, Peng Yong, Hu Xiaoyang *et al.*. Precise measurement system for reflectivity scanning of large aperture components [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1601~1604  
易亨瑜, 彭勇, 胡晓阳等. 大口径元件反射率的镜面扫描精密测量系统[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11): 1601~1604
- 23 Gao Lifeng, Xiong Shengming, Li Bincheng *et al.*. Analysis of reflectivity measurement by cavity ring-down spectroscopy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 335~338  
高丽峰, 熊胜明, 李斌成等. 用光腔衰荡技术测量镜片的反射率[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(3): 335~338
- 24 Y. Gong, B. C. Li. Ray-transfer-matrix model for accurate pulsed cavity ring-down measurement in the mismatching case [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(21): 3860~3867
- 25 Gao Lifeng, Xiong Shengming, Huang Wei *et al.*. Mid-IR optical parametric oscillator for high reflectivity measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 151~154  
高丽峰, 熊胜明, 黄伟等. 中红外光参变振荡器在高反射率测量中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 151~154
- 26 Ren Gang, Cai Banwei, Xiong Shengming *et al.*. Reliability estimation of the precise measurement system for the high reflectivity of COIL mirrors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(11): 1393~1396  
任刚, 蔡邦维, 熊胜明等. COIL腔镜高反射率精密测量系统的可靠性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(11): 1393~1396
- 27 Wang Li, Cheng Xinbin, Wang Zhanshan *et al.*. Influence of fitting data number on measurement of reflection based on cavity ring-down[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(5): 871~873  
王利, 程鑫彬, 王占山等. 数据拟合点的截取对光腔衰荡法测量反射率的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(5): 871~873
- 28 Liu Rong, Li Feng, Bai Jintao. High reflectivity measurement by cavity ring-down spectroscopy[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(1): 11~14  
刘蓉, 李锋, 白晋涛. 光腔衰荡法测量高反射率的实验研究[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(1): 11~14
- 29 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- 30 J. Morville, D. Romanini, A. Campargue *et al.*. OPO-pulsed CRDS of the visible collision induced absorption bands of oxygen at low temperature[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, **363**(5-6): 498~504
- 31 Ch. Mühlig, G. Schmidl, J. Bergmain *et al.*. Characterization of high reflecting coatings and optical materials by direct absorption and cavity ring down measurements[C]. *SPIE*, 2008, **7102**: 71020T
- 32 Y. Le Grand, A. Le Floch. Sensitive dichroism measurements using eigenstate decay times[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9): 1244~1248
- 33 D. Romanini, A. A. Kachanov, N. Sadeghi *et al.*. CW cavity ring down spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **264**: 316~322
- 34 I. Debecker, A. K. Mohamed, D. Romanini. High-speed cavity ringdown spectroscopy with increased spectral resolution by simultaneous laser and cavity tuning[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 2906~2915
- 35 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 1238~1245
- 36 G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 363~365
- 37 Li Liping, Liu Tao, Li Gang *et al.*. Measurement of ultra-low losses in optical supercavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1401~1405  
李利平, 刘涛, 李刚等. 超高精细度光学腔中低损耗的测量[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1401~1405
- 38 Y. Gong, B. C. Li. High reflectivity measurement with a broadband diode laser based cavity ring-down technique[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(3): 477~482
- 39 Gong Yuan, Li Bincheng. Broadband continuous-wave cavity ring-down technique with combined cavity configurations for high reflectivity measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 857~860  
龚元, 李斌成. 宽谱连续波复合衰荡光腔技术测量高反射率[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 857~860
- 40 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
- 41 Gong Yuan, Li Bincheng. Fitting method for high reflectivity measurement with phase-shift cavity ring-down technique[J].

- High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8): 1287~1290
- 龚元, 李斌成. 相移光腔衰荡高反射率测量技术中的拟合方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(8): 1287~1290
- 42 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
- 43 Liang Yonghui, Hu Shaomin. Determining the total loss of a passive resonant cavity by amplitude-modulated light[J]. *Applied 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
- 44 R. Engeln, G. von Helden, G. Berden *et al.*. Phase shift cavity ring down absorption spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1996, **262**(1-2): 105~109
- 45 N. Uehara, A. Ueda, K. Ueda *et al.*. Ultralow-loss mirror of the parts-in- $10^{-6}$  level at 1064 nm[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 530~532
- 46 J. M. Herbelin, J. A. McKay, M. A. Kwok *et al.*. Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(1): 144~147
- 47 Liang Yonghui. Ultra-High Reflectometer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000
- 梁永辉. 极高反射率测量仪[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000
- 48 R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy. Regimes of feedback effects in 1.5  $\mu\text{m}$  distributed feedback lasers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(11): 1655~1661
- 49 Y. Gong, B. C. Li, Y. L. Han. Optical feedback cavity ring-down technique for accurate measurement of ultra-high reflectivity[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **93**(2-3): 355~360
- 50 J. Morville, D. Romanini. Sensitive birefringence measurement in a high-finesse resonator using diode laser optical self-locking [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**(6): 495~509
- 51 V. Motto-Ros, J. Morville, P. Rairoux. Mode-by-mode optical feedback: cavity ringdown spectroscopy[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **87**(3): 531~538
- 52 V. Motto-Ros, M. Durand, J. Morville. Extensive characterization of the optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy (OF-CEAS) technique: ringdown-time calibration of the absorption scale[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(1): 203~211
- 53 Y. Gong, B. C. Li. Effect of instrumental response time in exponential-decay based cavity ring-down techniques for high reflectivity measurement[C]. *SPIE*, 2007, **6720**: 67201E
- 54 Y. Gong, B. C. Li. Diode laser based continuous-wave cavity ring-down technique for high reflectivity measurement[C]. *SPIE*, 2007, **6723**: 672356
- 55 Y. Gong, B. C. Li, L. F. Gao *et al.*. Optical feedback and pulsed cavity ring-down (CRD) techniques for high reflectivity measurement: a comparison study[J]. *Acta Photonica Sinica* (in press)