

文章编号: 0258-7025(2006)09-1247-04

连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率

龚元^{1,2}, 李斌成¹

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

摘要 提出了基于宽谱半导体激光器连续激光光腔衰荡法测量高反射率的方法, 给出了方波调制连续激光光腔衰荡法理论。采用锁相技术记录光腔输出信号一次谐波的振幅和相位, 由振幅和相位随调制频率的变化曲线分别拟合衰荡时间。给出了不同腔长下两种拟合方式分别得到的衰荡时间, 最终确定腔镜反射率为99.70%, 误差小于0.01%。由频域拟合方式得到反射率结果, 使可靠性得到提高。与脉冲激光光腔衰荡法相比, 采用连续半导体激光器作光源, 大大降低了成本, 且由于光束质量高, 更有利于提高测量精度。

关键词 测量; 高反射率; 光腔衰荡; 宽谱; 连续激光

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Continuous-Wave Cavity Ring-Down Technique for Accurate Measurement of High Reflectivity

GONG Yuan^{1,2}, LI Bin-cheng¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A continuous-wave cavity ring-down spectroscopy (CW-CRDS) technique employing a broad-band diode laser is developed for the high reflectivity measurement. The theory of square-wave modulated CW-CRDS is presented. Both amplitude and phase shift of the first harmonic of the CRDS signal, measured at an appropriate frequency range, are detected by a lock-in method and fitted to obtain the ring-down time and the reflectivity. The measurements are repeated with different cavity spacings and the reflectivities are determined by the frequency-domain fitting methods. The reflectivity of the cavity mirror is determined to be 99.70% ± 0.01%. The agreement among the reflectivities determined with the frequency-domain fitting techniques indicates the high reliability of the CW-CRDS technique. Compared with the pulsed CRDS approach, the CW-CRDS technique is simple, low-cost and highly precise due to the use of a CW diode laser with high beam quality.

Key words measurement; high reflectivity; cavity ring down; broad-band; continuous wave diode laser

1 引言

光腔衰荡光谱技术(CRDS)是一种高灵敏度吸收光谱技术, 一般用来测量气体的微弱吸收。当腔内未充气体时, 可精确测量高反射率。连续激光光腔衰荡光谱技术(CW-CRDS)于1980年由Herbelin等^[1]提出, 以窄谱连续激光为光源, 采用衰减相移技术得到反射率测量精度达0.01%。1992年 Rempe

等^[2]用窄谱连续激光器作为光源, 同时用压电陶瓷(PZT)调制腔长, 采用阈值触发方式探测光腔指数衰减输出, 得到反射率99.99984%。

窄谱连续激光光腔衰荡法需调制腔长或调谐激光波长以保证足够的能量耦合进光腔, 装置较为复杂。与窄谱激光相比, 宽谱激光可激发衰荡腔的多个本征纵模, 确保激光耦合进光腔, 并连续输出, 装置简单。采用脉冲激光光腔衰荡法^[3,4]测量高反射

收稿日期: 2006-02-06; 收到修改稿日期: 2006-03-03

作者简介: 龚元(1981—), 男, 湖北当阳人, 中国科学院光电技术研究所博士研究生, 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, 湖北天门人, 中国科学院光电技术研究所研究员, 博士, 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

率,成本高,且测量精度受脉冲激光光束质量差、激光腔内模式竞争等因素的限制。而连续激光光腔衰荡光谱技术可采用半导体激光器,大大降低了测量成本,且光束质量高(TEM₀₀基模),更有利于提高测量精度。而且半导体激光器波长覆盖范围大,便于连续激光光腔衰荡光谱技术应用于各种波段高反射反射率的测量。

2 理 论

连续激光光腔衰荡法原理如图 1 所示,采用方波调制连续激光,在腔内多次反射后的输出为与调制方波同频率的周期信号,相对于入射方波信号,存在相位延迟和振幅衰减。连续激光经方波调制,可展开为

$$I_{sq}(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \cos(k\omega_0 t) \quad (1)$$

方波振幅归一化。式中 ω_0 为调制角频率, k 为奇次整数。

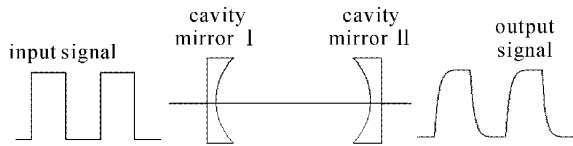


图 1 连续激光光腔衰荡法原理图
Fig. 1 Principle of CW-CRDS

此线性系统的脉冲响应为单指数衰减函数,方波调制连续激光光腔输出信号可归一化为^[5]

$$I(t) = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t I_{sq}(t') e^{-(t-t')/\tau} dt' = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k(1+k^2\omega_0^2\tau^2)} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) \times [\cos(k\omega_0 t) + k\omega_0\tau \sin(k\omega_0 t)], \quad (2)$$

式中 τ 为衰荡时间,大小取决于腔长和光腔总损耗(包括透射、吸收、衍射和散射等因素),对于高反射,可表示为^[6]

$$\tau = \frac{L}{c(1-R+\alpha L)}, \quad (3)$$

其中 $R = \sqrt{R_1 R_2}$, R_1, R_2 为两腔镜的反射率, α 为除透射外的其他损耗, L 为腔长。对于奇次谐波

$$I_k(t) = I_1 \cos(k\omega_0 t + \phi), \quad (4)$$

其振幅和相位分别表示为

$$I_1 = \frac{2}{k\pi \sqrt{1+k^2\omega_0^2\tau^2}}, \quad (5)$$

$$\tan\phi = -k\omega_0\tau, \quad (6)$$

若探测一次谐波的相位,则与 Engeln 等^[5] 结论一致。(5),(6) 式表明,可由振幅和相位随调制频率的变化曲线拟合得到衰荡时间,当忽略除透射外的其他损耗时,由 (3) 式可得到腔镜反射率 R 。

光腔的频谱透射函数近似为梳状函数,其周期为光腔的自由光谱范围 $\nu_F = c/2L$ 。若激光频率 ν 与光腔谐振频率 ν_c ($\nu_c = n\nu_F$, 即自由光谱范围的整数倍) 共振,激光在腔内形成驻波,该频率的光强理论透过率为 1。当激光谱宽 $\Delta\nu < \nu_F$ (使用窄带激光器情况) 时,激光频率无法自动与光腔谐振频率共振。实验上可采用压电陶瓷调制腔长^[2] 来达到共振,此时耦合进光腔的激光功率迅速增加。快速触发关掉压电陶瓷,可探测到光腔指数衰减型输出信号。当使用宽谱激光器时,激光谱宽 $\Delta\nu \gg \nu_F$, 此时总有多条激光谱线与光腔谐振频率共振,因此无需调制腔长即可实现共振,从而探测到光腔衰荡信号。使用宽谱激光器同时也减小了腔长和波长漂移产生的输出功率起伏及其对反射率测量的影响。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。光源为半导体激光器 (Melles Griot 56ICS115/HS, 中心波长 828 nm, 标称谱宽 3 nm, TEM₀₀ 模输出功率 100 mW), 由函数发生器方波调制。望远系统使激光模式与衰荡腔的本征横模相匹配。氦氖激光器辅助调节光路。两块相同的平凹镜镀制高反射膜,中心波长 828 nm,膜系 Sub/10(HL)H/Air(Sub:石英, H:TiO₂, L:SiO₂), 采用电子枪蒸发沉积方式,腔镜设计反射率

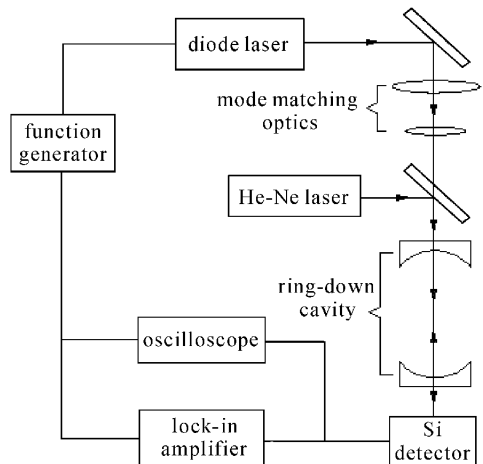


图 2 连续光腔衰荡法测量高反射率装置示意图
Fig. 2 Schematic view of the CW-CRDS setup for high reflectivity measurement

99.94%, Lambda-900 测量值 $99.9\% \pm 0.3\%$ 。两块高反镜组成稳定腔, 激光在腔内来回多次反射, 由 Si 探测器接收光腔衰荡信号。当光腔为稳定腔, 激光模式与腔本征模匹配时, 光腔损耗最小, 才能得到最佳测量结果。信号一次谐波的相位和振幅随调制频率的变化由锁相放大器记录。

4 实验结果

图 3(a), (b) 分别为 10 kHz, 50 kHz 调制时, 连续激光光腔衰荡法时域衰荡波形及方波参考信号。时域信号为与调制方波同频率的周期函数。当调制频率较低时, 相位延迟较小, 波形近似为方波。随着调制频率升高, 相位变化增大, 信号波形逐渐接近三角波。

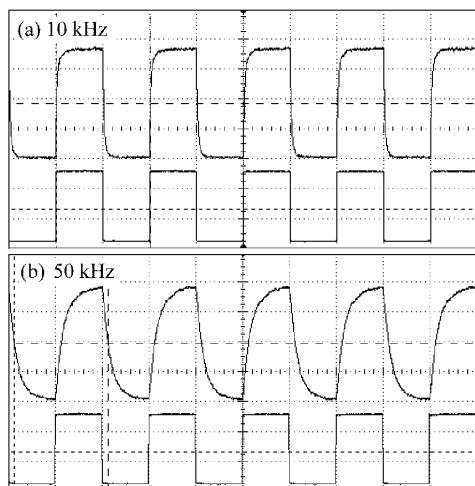


图 3 连续激光光腔衰荡法时域信号波形及方波参考信号

Fig. 3 Wave-shape of CW-CRDS in time domain and the square-wave reference signal

光腔输出信号一次谐波的相位和振幅由锁相放大器记录。图 4 描述了不同腔长的相位正切值与调制角频率的线性关系, 斜率的绝对值为衰荡时间。在单个调制频率下, 可根据相位值直接计算出对应的衰荡时间和反射率, 因此相位正切值拟合所得结果为多个调制频率下的平均值, 可以减小测量误差。如图 5 所示, 由振幅与调制角频率的关系曲线拟合可得衰荡时间, 振幅由入射波振幅归一化, 横坐标取对数坐标。表 1 给出了不同腔长下分别由振幅和相位拟合得到的衰荡时间和腔镜反射率。不同腔长时测量的腔镜反射率的统计结果为 $99.70\% \pm 0.01\%$ 。同时根据 (3) 式, 衰荡时间与腔长为正比关系, 通过

线性拟合也可以得到腔镜反射率为 99.700% , 误差为 0.006% 。不同腔长情况下得到的反射率结果一致, 表明实验中腔长可能的失谐量^[7]对测量结果的影响较小。

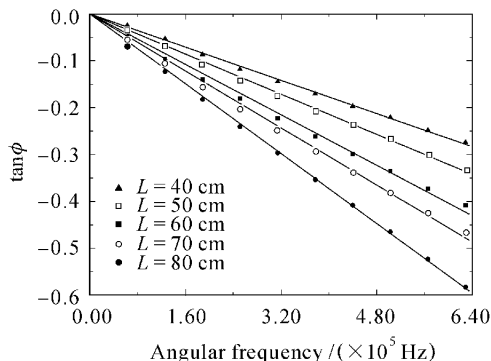


图 4 相位正切值随角频率的变化曲线
Fig. 4 $\tan\phi$ versus angular frequency

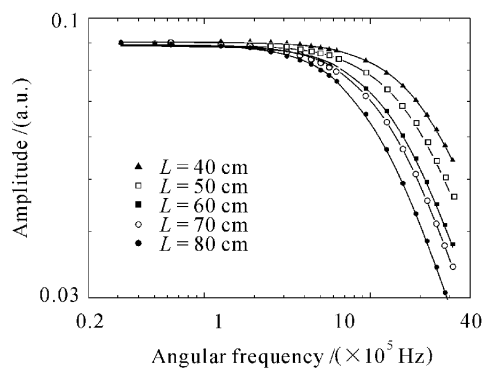


图 5 振幅随调制角频率的变化曲线
Fig. 5 Amplitude versus angular frequency

表 1 不同腔长下由振幅和相位拟合的衰荡时间和反射率结果

Table 1 Ring-down time and reflectivity at different cavity lengths fitted by the amplitude and phase-shift

Cavity length / cm	Ring-down time (μs) & $R(\%)$ fitted by amplitude		Ring-down time (μs) & $R(\%)$ fitted by phase-shift	
	40	0.43	99.69	0.44
50	0.53	99.69	0.54	99.69
60	0.69	99.71	0.67	99.70
70	0.77	99.70	0.76	99.69
80	0.96	99.72	0.93	99.71

光腔衰荡法测量精度非常高^[3]。当忽略衰荡腔内吸收、散射等损耗时, 腔镜反射率 $R = 1 - L/\tau$, 则其测量精度 $\Delta R = (1 - R)(-\Delta L/L + \Delta\tau/\tau)$, 反射率越高, 其测量精度也越高。实验中 $|\Delta L/L| <$

0.5%, $|\Delta\tau/\tau| < 2.0\%$, 腔镜反射率99.7%对应 $\Delta R < 7.5 \times 10^{-5}$, 与实验结果基本一致。若用反射率为99.99%的腔镜进行实验, 相同实验条件下误差则降到 $\Delta R < 2.5 \times 10^{-6}$ 。

5 结 论

利用基于宽谱半导体激光器连续激光光腔衰荡法对中心波长为 828 nm 的腔镜进行了测量, 得到反射率的测量结果为99.70%, 误差小于0.01%, 与 Lambda-900 测量结果一致。在光腔衰荡法测量高反射率技术中使用宽谱连续半导体激光器作光源, 与脉冲光腔衰荡法相比, 大大降低了成本。与使用窄带连续激光光源相比, 简化了装置构型, 降低了对系统的控制要求, 提高了系统的稳定性和可靠性, 有利于进一步提高测量精度, 为发展低成本、高精度的连续激光光腔衰荡法测量高反射率技术提供了理论和实验依据。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble *et al.*. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5):363~365
- 3 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
- 4 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
- 5 Richard Engeln, Gert von Helden, Giel Berden *et al.*. Phase shift cavity ring down absorption spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1996, **262**:105~109
- 6 Gerard Meijer, Maarten G. H. Boogaarts, Rienk T. Jongma *et al.*. Coherent cavity ring down spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1994, **217**(1,2):112~116
- 7 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

1 J. M. Herbelin, J. A. McKay, M. A. Kwok *et al.*. Sensitive