

用光腔衰荡光谱方法精确测量 高反镜的反射率*

孙福革 戴东旭 解金春**

(中国科学院大连化学物理研究所分子反应动力学国家重点实验室 大连 116023)

孙 龙 房本杰

(中国科学院大连化学物理研究所 863 短波长化学激光国家重点实验室 大连 116023)

提要 介绍了利用光腔衰荡光谱技术高精度地检测高反镜的反射率的实验方法。利用直型和折叠型衰荡光腔结合,可以高精度地测定高反镜的反射率。实验结果表明这一方法可以精确地测定各种反射角度、镜片基底和尺寸的高反镜的反射率,而且还可以检测实际工作气氛下高反镜的反射率。

关键词 光腔衰荡光谱, 反射率, 高功率激光

1 引 言

光腔衰荡光谱方法^[1]是近年来兴起的吸收光谱技术。它通过对指数型的腔内衰荡信号的检测,摆脱了激光能量输出的起伏所引起的误差。由两片 99.99% 反射率组成的光腔对损耗的测量精度可达百万分之一。我们利用光腔衰荡光谱方法的优良特性,建立了直型和折叠型衰荡光腔,进行了高反镜的反射率的测定工作。实验结果表明这一方法可以精确地测定各种反射角度、镜片基底和尺寸的高反镜的反射率,反射率越高,测量结果的精确度也越高,几乎可以测量任意高的反射率。而且还可以检测实际工作气氛下高反镜的反射率。

2 实验原理

光腔衰荡光谱方法的原理可见文献[2]。反射率分别为 R_1, R_2 的腔镜 M_1 和 M_2 构成光学谐振腔,当一束纳秒级脉冲激光沿着光轴注入到腔内后,激光脉冲在两个腔镜之间来回反射而形成振荡。在腔镜 M_2 后面,由光探测器检测腔内激光脉冲的衰减过程。

假设腔长为 L ,腔内充满吸收系数为 α 的气体介质,腔内激光脉冲强度随时间指数衰减的衰减寿命

* 本工作得到激光技术青年科学基金、中国科学院“百人计划”、国家自然科学基金委“杰出青年基金”的资助和支持。

** 通讯联系人。

收稿日期: 1997-09-22; 收到修改稿日期: 1998-01-08

$$\tau = 2L / [\ln(R_1 R_2)^{-1} + 2\alpha L] c \quad (1)$$

若谐振腔内为真空, 光脉冲衰减寿命 τ 仅由腔镜反射率和腔长决定,

$$\tau = 2L / \ln(R_1 R_2) \quad (2)$$

则得到平均腔镜反射率为

$$R = (R_1 R_2)^{1/2} = 1 - L/c\tau \quad (3)$$

由式(3)得到腔镜反射率的检测精度 $\Delta R = (1 - R)(-\Delta L/L + \Delta\tau/\tau)$ 。由于在实验中每个 τ 值都经过数百个数据点拟合得到, 精度很高, 一般情况下 $\Delta\tau/\tau < 0.001$ 。对腔长的测量相对误差通常为 $\Delta L/L < 0.5\%$, 所以 $|\Delta L/L| + |\Delta\tau/\tau| < 1\%$, 最终有 $\Delta R < 0.01(1 - R)$ 。如果 $R > 0.99$, 则 $(\Delta R/R) \approx \Delta R < 0.0001$, 测量结果为 $0.99XX$, X 代表有效数字。如果 $R > 0.999$, 则 $(\Delta R/R) \approx \Delta R < 0.00001$, 测量结果为 $0.999XX$ 。如果 $R > 0.9999$, 则 $(\Delta R/R) \approx \Delta R < 0.000001$, 测量结果为 $0.9999XX$, 等等。所以反射率愈高, 该方法所提供的反射率测量结果的精度也愈高, 给出的反射率有效数字位数总是能大于实际反射率中“9”的数目。

3 实验装置

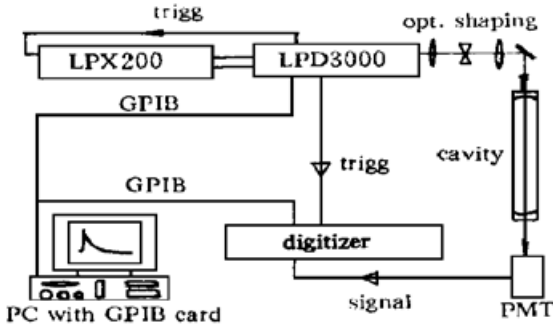


图 1 光腔衰荡光谱实验设置

Fig. 1 Schematic illustration of the cavity ring-down spectroscopic experiment

实验设置已在文献[2]中有详细介绍。如图1所示, 由准分子激光(LPX200, Lamda Physik)泵浦的染料激光器(LPD3000, Lamda Physik)输出的脉冲激光经过空间滤波后进入高反镜构成的衰荡光腔中。光强衰荡信号由放在另一腔镜后面的光电倍增管接收后送入数字化仪(7612D, Tektronix), 数字化后的波形传给计算机处理。整个实验系统的控制和数据处理都由一台配置了一块 GPIB 接口板(AT-GPIB/TNT (PnP), National Instrument) 的 Pentium 133 PC 进行。

4 结果与讨论

4.1 直型衰荡光腔检测腔镜反射率

我们利用 NEWPORT 公司的 10CV0030F 型高反镜组成衰荡光腔, 腔长为 90 cm, 中心波长为 620 nm, 反射面曲率半径为 1 m。光腔内反复用高纯氮气冲洗, 以清除腔内的水气等吸收气体。

图 2 是记录到的光腔衰荡信号, 此时激光波长为 640 nm。拟合得到衰荡时间 $\tau = 14.159(5) \mu\text{s}$, 测得腔镜反射率为 $R = 1 - L/c\tau = 99.9788(2)\%$ 。再考虑到腔长测量的 0.5% 偏差, 腔镜反射率为 $R = 99.979(1)\%$ 。图 3 是腔镜反射率随激光波长变化情况。在中心反射波长 620 nm 处腔镜的反射率达到 99.98%, 曲线变化趋势表明腔镜的反射率随着波长远离中心波长而逐渐降低。图中左侧的一些尖峰是由微量水气吸收所致。

由以上结果可知, 利用光腔衰荡光谱方法可以高精度地测定腔镜的反射率, 但此时测得的反射率 R 为 $\sqrt{R_1 R_2}$, 只有其中一个镜的反射率 R_1 已知, 才能求得另一个 R_2 。如果有第三个镜

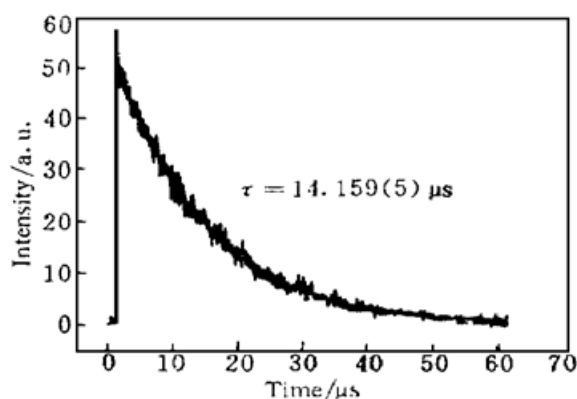


图 2 衰荡腔内光强衰减曲线; 腔长为 90 cm, 激光波长为 640 nm

Fig. 2 The decay curve in the ring down cavity, taken with a cavity length of 90 cm and laser wavelength of 640 nm

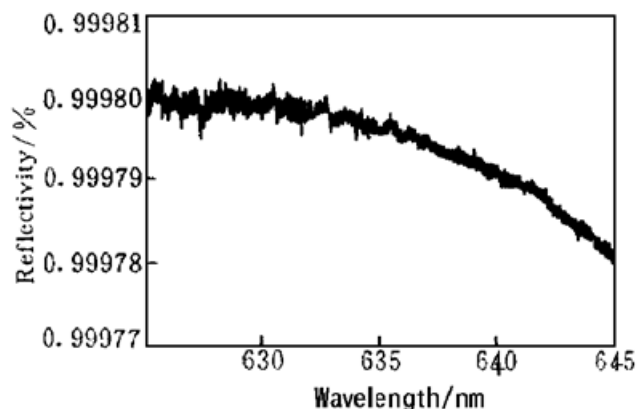


图 3 镜反射率随波长变化曲线。样品镜为 NEW-PORT 出品, 中心波长为 620 nm。每个数据点经过 10 次平均

Fig. 3 The curve of mirror reflectivity. Mirrors are 10CV0030F mirrors from NEW-PORT, which are centered at 620 nm. Each data points are averaged over 10 shots

子 R_3 , 就可以有 $(R_1, R_2), (R_2, R_3), (R_3, R_1)$ 三个组合, 测得三个 R 值, 从而可以解出 R_1, R_2 和 R_3 。此外, 此方法要求腔镜的尺寸规则, 镜片的基底必须是透光的材料, 而且只能检测 0° 角的反射镜。

4.2 折叠腔检测腔镜高反射率

利用前述的腔镜建立了光腔衰荡光谱装置, 还完成了微量水气含量的检测工作。实验结果表明检测极限低于 $2 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$, 相当于在 1 m 的光腔内可以检测出低于 2×10^{-6} 的腔内损耗。这一结果表明利用反射率较低的腔镜可以检测出远低于腔镜透过率的腔内损耗。

折叠衰荡光腔的原理如图 4 所示。在折叠衰荡光腔中, 腔内损耗由腔内的介质吸收和被测镜的透过损耗产生。我们把被测镜作为原直腔中的一项损耗来测量。由折叠腔的损耗减去直腔的损耗, 就得到被测镜的反射率。根据前述结果分析, 此时可以检测反射率高达 99.9998% 的腔镜。

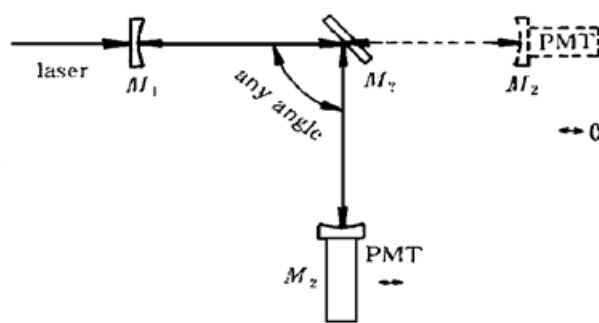


图 4 折叠谐振腔方法测量镜反射率原理图

Fig. 4 Principle diagram of mirror reflectivity measurement

图 4 中, 直型衰荡光腔的衰荡时间为 τ_0 , 由(1) 式所示, 折叠谐振光腔的衰荡时间

$$\tau = 2L/c[\ln(R_1R_2) - 2R_? + \alpha L] \tag{4}$$

所以被测腔镜的反射率为

$$R_? = 1 - (1/\tau - 1/\tau_0)L/c \tag{5}$$

由以上推导, 发现由于腔长的一致, 腔内介质吸收产生的损耗恰好抵消, 因此可以检测各种气氛下的腔镜反射率, 使得这一方法更具实际意义。此外, 如果介质没有吸收, 那么只要腔长的测

量精度较高,就不必苛求直型衰荡光腔和折叠型衰荡光腔的腔长完全一致。

图 4 还表明,此时对被检测腔镜的尺寸和基底没有任何要求,而且可以测量任意反射角度的腔镜反射率。

实验中,首先我们测得直型衰荡光腔的衰荡时间 τ_0 ,然后再引入被测腔镜组成腔长相同的折叠型衰荡光腔,测定它的衰荡时间 τ ,由两个衰荡时间便可以确定被测腔镜的反射率。

图 5 是测定的 Quanta Ray 的 45°激光耦合镜(Wex Beam Combiner,反射范围为 540~640 nm)的反射率曲线。在 625 nm 处腔镜反射率为 99.80%,随着激光波长的红移,反射率逐渐降低。以 630 nm 处为例,耦合镜的反射率为 99.779(4)%。

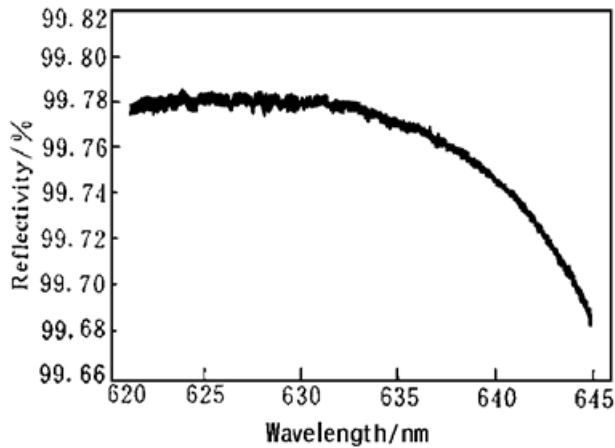


图 5 镜 45°角反射率随波长变化曲线。被测镜是 Qunata Ray 出品的 Wex 并束器,在 540~640 nm 之间有高反射率。衰荡腔中为空气,每个数据点经 10 次累加平均

Fig. 5 Curve of mirror reflectivity at 45° reflective angle. The measured mirror is a Wex beam combiner from Quanta Ray, which has a highly reflective range of 540~640 nm. Cavity is filled with air. Each data points are an average of 10 shots

致谢 顾玉昆参与了本实验室的建设,沙国河、桑凤亭、杨柏龄、张存浩对工作进行了有益的指导,在此表示感谢;解金春感谢香港“求是基金会”和美国“李氏基金会”的支持。

参 考 文 献

- 1 A. O'Keefe, D. A. G. Decon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources. *Rev. Sci. Instru.*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- 2 Dongxu Dai, Fuge Sun, Lu Kang *et al.*. A high rep. rate real time measurement of cavity ring down spectroscopy. *Chinese J. Chem. Phys.* (化学物理学报), 1997, **10**(6): 481~486 (in Chinese)

Accurate Reflectivity Measurement of High Reflective Mirrors via a Cavity Ring-down Method

Sun Fuge¹ Dai Dongxu¹ Xie Jinchun¹ Sun Long² Fang Benjie²

¹The State Key Laboatory of Molecular Reaction, ²The State Key Laboratory of Short Wavelength Chemical Laser, Dalian Institute of Chemical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Dailan 116023

Abstract This paper describes measurement of mirror reflectivity via cavity-ring-down-spectroscopy. The method can accurately determine the reflectivity of a mirror, using combination of linear and folded cavities. Results show that this method can measure reflectivity of mirrors of different sizes and media, at any reflection angles, possibly, under working circumstances.

Key words cavity-ring-down-spectroscopy, reflectivity, high-power laser