

复合衰荡光腔技术精确检测 CO₂ 腔镜高反射率*

盛新志 孙福革 白吉玲 顾玉昆 沙国河 谢金春

(分子反应动力学国家重点实验室, 中科院大连化物所, 大连 110 信箱, 116023)

房本杰 孙 龙 庄 琦 杨柏龄 桑凤亭

(国家 863 计划短波长化学激光重点实验室, 中科院大连化物所, 大连 110 信箱, 116023)

摘 要 采用直型和折叠型衰荡光腔相结合技术精确检测了 CO₂ (氧碘化学激光器) 平面高反腔镜在 1.315 μm 的实际反射率为 99.931%, 测量精度 10⁻⁵。该技术对镜片的反射镜角度、基底材料透光性能及尺寸无特殊要求, 可由反射率相对较低的腔镜测量高反射率镜片。

关键词 衰荡光腔技术 反射率 氧碘化学激光器

中图分类号 TN 248

高反射率腔镜组成的谐振腔是大功率氧碘化学激光系统的重要组成部分。腔镜反射率的高低不仅对激光系统的效率及输出功率有影响, 而且对光束质量起着决定性的作用^[1]。精确检测腔镜的反射率是研制高反射率 CO₂ 腔镜的前提。现有的反射率检测方法, 如光透射法、多次反射法等, 对于“反射率大于 99.6%”的高反射率已不能给出准确结果^[2], 且设备昂贵、操作复杂, 不能满足大量检测的需求, 也不能实现腔镜工作气氛下反射率的测量。

常规光腔衰荡谱方法^[3]是 O'Keefe 与 Deacon 于 1988 年底首先建立的新激光光谱技术, 它与长程多次反射池^[4]及内腔光谱^[5]等技术的本质差别在于不是吸收光程的长短, 而是用出射光强指数衰减的衰荡时间来消除激光强度的涨落所造成的影响, 因而测量精度大为提高^[6]。但该技术只能用来测量真空中腔镜的反射率。我们采用直型和折叠型光腔相结合的复合衰荡光腔技术, 能更精确检测 CO₂ 腔镜的实际高反射率, 且装置简单, 对工作环境要求低, 有希望发展成为现场检测手段。

1 检测原理

一束激光脉冲从两个高反射率腔镜组成的稳定光学谐振腔一端注入后, 在腔镜之间来回反射形成振荡。激光脉冲在腔内每一次循环, 能量都会因腔镜透射和腔内介质损耗而衰减。因腔内衍射和散射等损耗很小可忽略, 只考虑腔镜透射和腔内介质吸收, 则在后腔镜泄漏了的第 n 个激光脉冲光强: $I_n = I_1 (R_1 R_2)^n e^{-2n\alpha}$, 式中, L 为腔长; α 为腔内介质吸收系数; R_1, R_2 分别为未知的前后腔镜的反射率。在 t 时刻 $n = t / (2L / c) = tc / 2L$, 则 $I(t) = I_1 (R_1 R_2)^{tc/2L} e^{-\alpha c t} = I_1 e^{L [\ln \sqrt{R_1 R_2} - \alpha] t}$, 即激光脉冲光强以指数形式衰减。衰荡寿命 $\tau_0 = L / c (\alpha - \ln \sqrt{R_1 R_2})$ 。

若谐振腔内是真空, 即 $\alpha = 0$, 则可由激光脉冲衰荡寿命 τ_0 、腔长 L 测定腔镜反射率 $R =$

* 国家 863 激光技术领域青年科学基金、国家自然科学基金杰出青年基金和中科院“百人计划”资助课题

1997 年 11 月 14 日收到原稿, 1998 年 3 月 2 日收到修改稿。

盛新志, 1962 年 4 月出生, 博士, 副研, 在站博士后

$\sqrt{R_1 R_2} = e^{-\frac{L}{\tau_0}}$ 。这就是 O'Keefe 等将衰荡光谱技术用于腔镜高反射率检测的技术原理^[3]。

这种方法的缺点是, 由于工作介质中的腔镜表面吸附及腔内介质损耗, 工作介质中和真空中的腔镜的反射率有差别, 测得值并不是在其工作气氛中的实际反射率。若谐振腔内充有介质, 则衰减时间将因腔内吸收等新增损耗而缩短, 假设 $\alpha=0$ 所得的反射率将偏低。

为更精确测量 CO₂ 腔镜的实际高反射率, 我们设计出直型和折叠型衰荡光腔技术相结合检测待测镜片的实验方案, 可以不假设 $\alpha=0$ 。即在待测镜片的工作介质中, 分别进行直型衰荡光腔和折叠型衰荡光腔衰荡寿命测量。首先进行直型衰荡光腔实验, 然后, 使用相同的端镜并保持腔长不变, 以反射率为 R_x 的待测镜片作反射镜, 将直型衰荡光腔变成折叠腔时激光脉冲能量衰减寿命的倒数为:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{c[2\alpha L - \ln(R_1^2 R_2)]}{2L} = \frac{c[2\alpha L - \ln(R_1 R_2)]}{2L} - \frac{c \ln R_x}{L} = \frac{1}{\tau_0} - \frac{c \ln R_x}{L}$$

其中 τ_0 为直型衰荡光腔测得的衰荡寿命; τ 为折叠腔测得的衰荡寿命。所以 $R_x = e^{(\frac{L}{\tau_0} - \frac{L}{\tau}) \frac{1}{c}}$ 。可见, 由于腔长一致, 腔内介质吸收等损耗恰好抵消, 因此可更精确测得待测镜片在其工作介质中的反射率值 R_x 。

2 实验装置及检测结果

复合衰荡光腔实验装置如图 1、图 2 所示。光源是 OPO 激光器 (Model SCANmate O PPO, Lambda Physics), 输出激光波长 1.315 μm , 脉宽 5~10ns, 输出能量 2.3mJ/pulse。探测器是

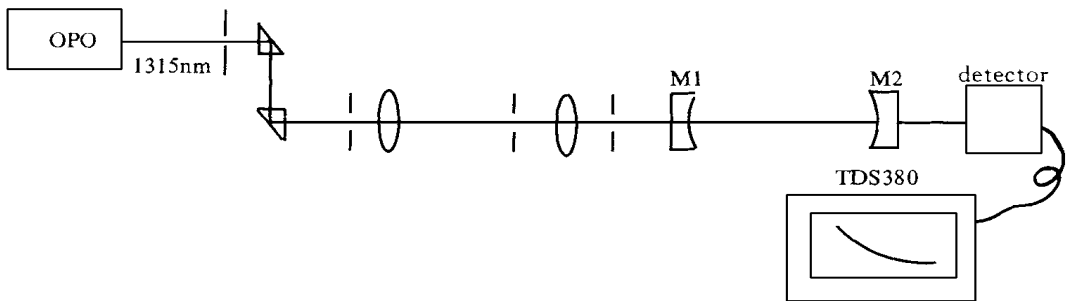


Fig 1 Schematic illustration of straight cavity ring down experiment. It consists of the laser, optical shaping, ring down cavity, detector and data acquisition.

图 1 直型衰荡光腔检测示意图 (由激光器、光束整形、衰荡光腔、探测器及数据记录部分组成)

国产 Ge 探测器, 信号记录采用数字存储示波器 (40QM, 2Gs/s, Model TDS380, Tektronix), 计算机进行后序数据处理。

使用自制的凹面反射镜 (半径 1 米, 双波长 1.315 μm , 0.6328 μm 全反镜), 首先按照图 1 构成 $L = 1.347\text{m}$ 直型衰荡光腔进行检测以降低噪声, 数据采集使用示波器的多次累加功能。1.315 μm 处于大气窗口, 介质吸收很小, 激光脉冲可以在两面高反镜之间建立振荡。图 3 为测得的衰荡波形。为检验本方法的测量精度, 进行两次检测, 测量直型腔衰荡寿命 τ_0 为 1569ns 和 1562ns 时, 对应的反射率 R 分别为 99.714% 和 99.713%。

然后保持直型衰荡光腔的端镜及腔长不变, 按图 3 构成折叠衰荡光腔进行检测。图 4 为其衰荡波形。测得衰荡寿命 τ 为 1245ns, 由此计算得出反射率 R_x 为 99.931%。

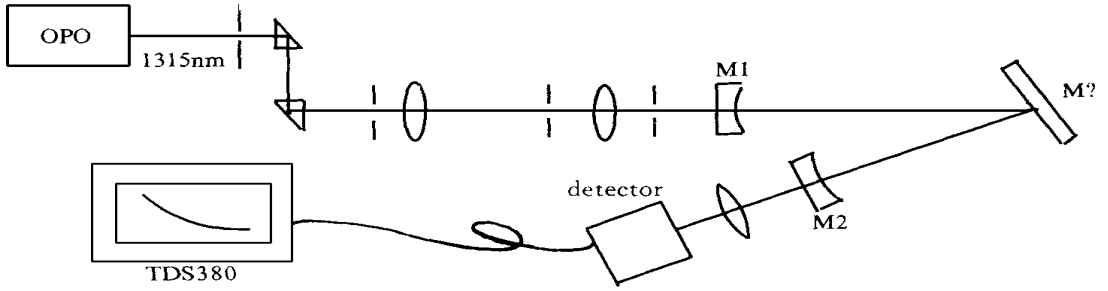


Fig 2 Schematic illustration of folded cavity ring down experiment It consists of the laser, optical shaping, folded ring down cavity, detector and data acquisition

图 2 折叠衰荡光腔检测示意图(由激光器、光束整形、折叠衰荡光腔、探测器及数据记录部分组成)

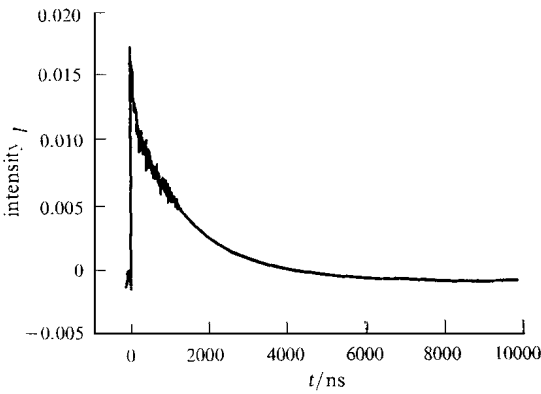


Fig 3 Decay curve of the straight cavity, with $L = 1.347\text{m}$ and $\lambda = 1.315\mu\text{m}$

图 3 直型衰荡光腔衰荡波形

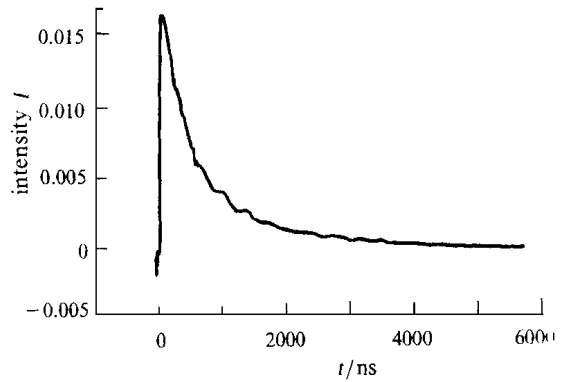


Fig 4 Decay curve of the folded cavity, with $L = 1.347\text{m}$ and $\lambda = 1.315\mu\text{m}$

图 4 折叠衰荡光腔衰荡波形

3 讨 论

一个被测量的相对误差大小, 决定其测量值有效数字的位数。按照误差理论, 真空中直型衰荡光腔的反射率测量相对误差为

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \right) \ln R \quad \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau_0}{\tau_0} \right) (1 - R)$$

可见腔镜反射率末位 9 之后有几位有效数字由 $(\Delta L / L + \Delta \tau_0 / \tau_0)$ 决定。对衰荡寿命 τ_0 的测量, 其相对误差随 τ_0 的增大而减小; 腔镜的反射率越高, 衰荡时间越长, 检测精度越高, 即随腔镜的反射率增大检测精度增高。这也是衰荡光腔技术测量反射率的特点。

腔镜的反射率在真空中与介质中有差别。实验经验表明, 介质中的衰荡时间较真空中短一些。这不只是由于工作介质中的腔镜外面介质折射率及腔内吸收、散射等介质损耗引起的, 更重要的是腔镜表面吸附对其反射率的影响。要检测在工作气氛下腔镜的实际反射率, 必须在衰荡光腔内充满工作介质。介质吸收将使衰荡寿命降低。测得的腔镜反射率 $R = \sqrt{R_1 R_2} / \exp(-\alpha L)$, 包含谐振腔内介质的吸收和散射等损耗成分。若想测出腔镜反射率值, 必须准确知道介质吸收、散射等介质损耗的大小。若忽略介质吸收、散射等介质损耗, 若假设 $\alpha = 0$, 尽管 $1.315\mu\text{m}$ 处于大气窗口吸收很小, 也会使得反射率测量值偏小。另外, 直型衰荡光

腔技术只能测量基底材料透光的 0° 反射镜, 不能确定单镜片的反射率。而直型加折叠衰荡光腔反射率测量法则可解决这些问题。改变折叠角度, 可测量任意反射角度的反射镜。因为光腔内激光脉冲每个循环两次经过作为折叠反射镜的待测镜, 一面反射镜相当于直型衰荡光腔中的两面反射镜, 测量灵敏度较高。

4 结 论

采用直型和折叠型衰荡光腔相结合技术, 由于腔长不变, 腔内介质吸收等损耗恰好抵消, 则可精确检测工作介质中任意基底材料、任意反射角高反腔镜的实际反射率。我们对直型衰荡光腔腔镜反射率的重复测量显示, 测量精度 10^{-5} 。使用反射率约 99.71% 的较低反射率腔镜作为稳定谐振腔的前后端镜, 对反射率高达 99.931% 的 CO₂ 平面全反镜进行了测量。采用复合光腔衰荡技术, 解决了工作环境下实际反射率的精确测量的难题。

致谢 张存浩对工作进行了有益指导, 得到安光所的龚知本、周军、高军毅等教授和大连化物所两重点实验室的领导和同志的大力支持, 作者对此表示谢意。

参考文献

- 1 桑凤亭, 金玉奇, 庄琦 强激光与粒子束, 1993, 5(3): 389~ 391
- 2 Anderson D Z, Frisch J C, and Masser C S. *Appl Opt*, 1984, 23: 1238~ 1242
- 3 O'Keefe A and Decon D A G. *Rev Sci Instrum*, 1988, 59(12): 2544~ 2550
- 4 Toth R A. *J Mol Spec*, 1994, 166: 176~ 179
- 5 Kachanov A, Charvat A, and Stoeckel F. *J Opt Soc Am*, 1995, B12(6): 970~ 975;
Compargue A, Pemogov D and Post P. *J Chem Phys*, 1995, 102(15): 5960~ 5967
- 6 Rom inini D, Kechonov A A, Sagleghi N. *Chem Phys Lett*, 1997, 264: 816~ 321

PRECISE MEASUREMENT OF CO₂ MIRROR'S REFLECTIVITY BY NOVEL CRDS

Sheng Xinzhi, Sun Fuge, Bai Jiling, Gu Yukun, Sha Guohe, Xie Jinchun

Fang Benjie, Sun Long, Shang Fengtin, Zuang Qi, and Yang Boling

Dalian Institute of Chemical physics, C A S, P. O. Box 110, Dalian, 116023, P. R. China

ABSTRACT Using combination of straight and folded ring down cavity technique, the high reflectivity of CO₂ mirrors at $1.315\mu\text{m}$ has been precisely measured. The experimental results show that the reflectivity is as high as 99.931% with measuring accuracy 10^{-5} . Mirrors measured can be opaque with any size at any angle of reflection. A cavity with lower reflectivity mirrors can be used to measure the higher reflectivity mirrors.

KEY WORDS cavity ring down technique, reflectivity, CO₂