

文章编号: 0258-7025(2010)04-1078-04

光腔衰荡技术测中红外腔镜反射率的实验研究

高丽峰 李斌成 熊胜明

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 根据光腔衰荡光谱(CRDS)技术原理,建立了直型光腔下 $3.3\ \mu\text{m}$ 波长反射率测试实验装置。测试了一对反射率为 99% 的腔镜,测试精度为 10^{-4} 。利用该装置得到不同腔长下激光在腔内振荡的时间衰减曲线。根据衰减曲线计算得到腔镜反射率,分析其均方根误差为 2.25×10^{-4} 。就透镜位置变化以及在光路中加光阑的方式改变腔内模式,研究其对衰荡实验的影响。实验发现,透镜的相对位置在 20 mm 调节范围内得到的反射率测试均方根误差为 2.55×10^{-5} 。另外发现使用加在光路中的光阑可以改善光腔模式匹配,减小衰减时间的拟合误差。

关键词 测量;反射率;光腔衰荡光谱;模式

中图分类号 O436;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20103704.1078

Experimental Investigation of Reflectivity Measurement for Cavity Mirror at Middle Infrared by Cavity Ring-Down Spectroscopy

Gao Lifeng Li Bincheng Xiong Shengming

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract A measure system for checking high reflectivity of the coating by cavity ring-down spectroscopy (CRDS) at IR wavelength has been set up. The measure precision could approximate to be 10^{-4} with a pair of high reflectivity concave mirror put aside to make a straight cavity. The ringdown curves have been gained in different cavity lengths, for change of cavity mode would cause different modulation depth curves. Then the reflectivity of the cavity mirror is calculated and the average square error is 2.25×10^{-4} . Then the influence of the reflective measure precision is studied with adjusting the relative position and adding the diaphragm in optic length which could change cavity mode. The average square error is 2.55×10^{-5} in the adjusting range of 20 mm between two lens. The use of the diaphragm in optic length could improve the match of the cavity modes which would reduce the accord error of the ringdown time.

Key words measurement; reflectivity; cavity ring-down spectroscopy; mode

1 引言

利用光腔衰荡光谱(CRDS)技术^[1]可通过测量光腔输出的指数衰减信号检测来获得反射率。由于腔内光强衰减率不随脉冲强度涨落而改变,所以测量结果与脉冲激光光强波动无关,测量精度高。目前国内在 $0.532\ \mu\text{m}$ ^[2], $0.620\ \mu\text{m}$ ^[3], $0.6328\ \mu\text{m}$ ^[4], $1.06\ \mu\text{m}$ ^[5], $1.315\ \mu\text{m}$ ^[6,7]等可见和近红外波长进行的高反射率精密测量中使用了光腔衰荡法。本文采用光腔衰荡光谱技术,使用光参量振荡器(OPO)在

$3.3\sim 3.6\ \mu\text{m}$ 脉冲光源建立了一套脉冲光腔衰荡光谱实验装置,可以测试中红外波段高反射率,测试精度达到 10^{-4} 。

2 测量原理

光腔衰荡实验原理如图 1 所示,反射率测量原理可参考文献[7],实验装置是由脉冲光源(由 Nd:YAG 激光抽运的光参量振荡器)、一对凸透镜 T1 和 T2 组成的望远系统、衰荡腔、两块平凹镜组成的衰荡腔 M1

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-11-11

基金项目: 国防科工委(58 工程)资助课题。

作者简介: 高丽峰(1975—),女,硕士,副研究员,主要从事光学薄膜与光学检测技术方面的研究。

E-mail: glfioe@hotmail.com

和 M2 以及探测器和示波器等构成。当一束脉冲激光由望远系统整形后沿着光轴入射到光腔内时,忽略衍射及散射损耗,脉冲光在两个腔镜之间往返振荡,每经过一次循环透射出部分光,M2 后面的探测器接收光脉冲信号的衰减规律。激光脉冲光强以单指数形式衰减。衰荡寿命 τ_0 定义为出射脉冲光强衰减为初始光强的 $1/e$ 时所需的时间,设两腔镜的反射率为 R_1 和 R_2 ,腔长为 L ,则

$$\tau_0 = \frac{L}{c(\alpha L - \ln \sqrt{R_1 R_2})}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, α 为谐振腔内损耗。若腔内损耗很小,可以忽略,则 $\alpha = 0$,若使用同罩镀制的两腔镜,则其反射率相等,于是

$$R_0 = \sqrt{R_1 R_2} = \exp(-L/c\tau_0), \quad (2)$$

由此即可测得高反射腔镜的反射率。

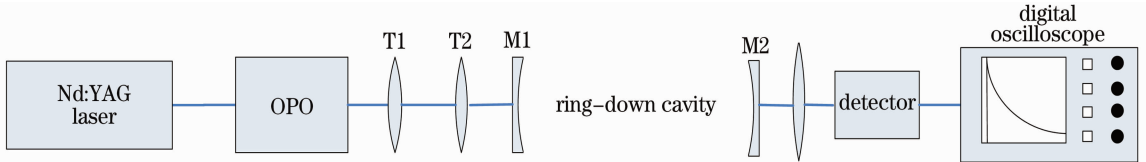


图 1 光腔衰荡实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cavity ring-down spectroscopy experiment

3 测试结果与实验分析

实验使用的光源输出波长在 $1.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 内可连续调谐,波长 $3.3 \mu\text{m}$ 左右的单脉冲能量约为 0.5 mJ ,脉宽为 7 ns 。实验中使用的光腔是一对口径为 $\phi 40 \text{ mm}$,凹面曲率半径为 1 m 的平凹镜,凹面镀制了中心波长为 $3.3 \mu\text{m}$ 的高反射薄膜,对该腔镜用 PE 公司的 P1000 分光光度计测量透射率,所得结果为在 $3.3 \mu\text{m}$ 处腔镜透射率为 $T=0.6\%$;探测器为 ZnHgGeTe 探测器,响应时间 0.5 ns ;信号记录采用 TEK 公司 500 MHz 数字存储示波器。实验中对 OPO 输出的光束用望远系统进行激光脉冲整形,采用同轴 He-Ne 激光调谐谐振腔镜后,激光脉冲可以在两面 0° 凹面高反镜之间建立起振荡,在示波器上得此衰荡光腔的衰荡曲线,拟合得到光腔的衰荡寿命,计算出腔镜的反射率。

3.1 不同腔长下测量结果及实验分析

实验中用的激光器输出脉冲宽度在纳秒量级,腔长根据实验条件限制在 1 m 以内,衰荡腔由两块平凹镜组成,凹面曲率半径一般在 $-25 \text{ cm} \sim -1 \text{ m}$ 之间,腔长即两腔镜的距离 L 的选择以光腔形成稳定腔为依据,腔长从 $3 \text{ cm}^{[8]}$ 到 $270 \text{ cm}^{[9]}$ 都有文献报道。实验中采集了腔长在 $10 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm}$ 的衰减曲线。表 1 所示为腔长在 $10 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm}$ 下做直腔衰减试验得到衰减寿命后,计算所得反射率的测量结果。

图 2 所示分别为 $0.1, 0.4, 0.6 \text{ m}$ 腔长时的衰减曲线。由实验所得不同腔长下的衰减曲线图发现,腔长较短时输出的振幅大,衰减时间短,衰荡曲线比

较光滑。腔长较大时振幅小,衰减时间长,叠加在衰减曲线上的调制深度逐渐增加。这是由于用光腔衰荡法测反射率时,腔长越短,则衰减时间越短,但此时衰减寿命的测量误差增大。腔长短时测到的光腔振幅较大,是由于腔长短时腔内的吸收光程短,此外光腔的衍射损耗小。

表 1 不同腔长下的腔镜反射率测量结果以及测量的均方根误差

Table 1 Reflectivity of cavity mirror at different cavity lengths and RMS

Cavity length/cm	Reflectivity /%
10	99.07
20	99.03
30	99.02
40	99.01
50	99.00
60	99.00
ΔR	7×10^{-4}
RMS	2.25×10^{-4}

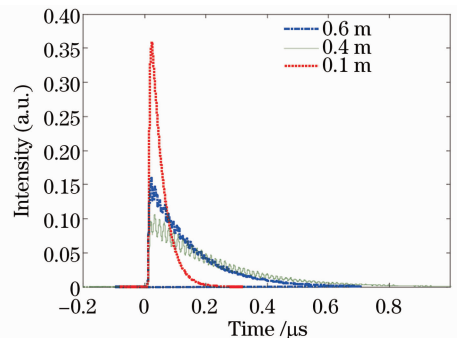


图 2 腔长不同时的衰荡曲线

Fig. 2 Diagram of cavity ring-down curve at different cavity lengths

在实验过程中观察到准直的 He-Ne 激光的自再现现象,即在两片腔镜上观察到如图 3 所示的激光束光斑。这是因为若激光束离轴入射到衰荡光腔^[10],经过多次反射后激光束会在腔内自再现传输, n 次反射后激光束叠加产生干涉效应,此时腔长为 L 的衰荡腔的光谱响应将等效于腔长为 nL 的衰荡腔。 n 越大,衰荡腔模间隔越小。当 n 非常大时,入射激光将在衰荡腔内激发准连续分布的一系列腔模,激光频谱覆盖许多个衰荡腔模,将得到稳定的光腔衰荡信号,从而得到高灵敏度的衰荡曲线探测^[11]。然而,腔长越长,腔模越多,叠加在衰减曲线上的调制越多,这将带来衰减曲线的拟合误差。本实验采取对衰荡曲线的对数作线性拟合的方式处理数据得到衰减寿命,这种线性拟合的数据处理方式与指数拟合方式相比对模式失配的程度不灵敏,在不同的模式失配情况下得到的拟合结果相差不大。

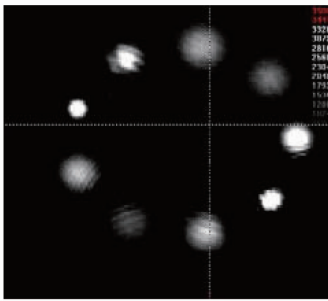


图 3 He-Ne 激光的自再现图像

Fig. 3 Diagram of the self-recurrence of He-Ne laser

3.2 利用透镜相对位置改变腔内模式对测量系统的影响分析

由于激励激光的带宽大于模式间隔,所以各模式都存在于腔内。在光腔衰荡波形上可以观察到由于各种模式的存在而引起的模拍调制。当衰荡波形平均后,残余模拍效应大大减小,显示出单指数衰减波形。若使用响应时间慢的探测器或进行了滤波,很难观察到模拍效应。在实验中使用的光参量振荡器发出的光束为准高斯光束,模式也并非简单的 TEM_{00} 模式,只有通过空间滤波将光束耦合进入衰荡光腔,以减少模式引起的振荡对实验系统的影响。

实验中采用两块凸透镜组成的望远系统将光束耦合进入光腔,透镜的焦距分别为: $f_1 = 150$ mm, $f_2 = 200$ mm,透镜位置距离 $l_{F_1 F_2} = 350$ mm,通过对该望远系统的调节,确保光源发出的激光的腰斑在衰荡光腔中间位置。

为了研究改变光腔内的模式对实验结果的影响,在腔长为 0.6 m 的情况下,在实验中改变透镜

的相对距离采集了衰减曲线,得到衰减时间和反射率如表 2 所示。由表 2 可知,改变透镜距离实际上是改变了腔内模式,在上述 20 mm 调节范围内得到的反射率测试均方根误差为 2.55×10^{-5} 。

表 2 不同透镜位置下衰减时间和反射率测量结果

Table 2 Cavity ring-down time and reflectivity at different positions of the lens

$l_{F_1 F_2} / \text{mm}$	$\tau / \mu\text{s}$	Reflectivity / %
350	0.19999 ± 0.0029	99.004
355	0.19872 ± 0.00266	98.999
360	0.199 ± 0.00258	99.000
365	0.19993 ± 0.00249	99.005
370	0.19955 ± 0.0022	99.002
RMS	4.91×10^{-4}	2.55×10^{-5}

3.3 使用光阑实现脉冲 CRDS 模式匹配的优化

关于如何优化模式匹配,提高 CRDS 的测试精度,有几种解决方法报道。例如:用 CCD 监控空间模式或使用快速响应探测器监控横模拍。另一种方法是监控衰减信号相对单指数信号的偏差。而最简单的方法是使用孔径光阑减小腔内的高阶横模^[12]。

实验中,在后腔镜后面放置孔径连续变化的光阑,采集光腔衰减曲线,观察到随孔径的减小叠加在衰减曲线上的调制深度逐渐减小。表 3 所示为光阑孔径从 4~18 mm 逐渐变化时,衰减时间和衰减时间的拟合误差以及反射率的测量值。由表 3 可知,随着光阑孔径的减小,衰减曲线的拟合误差明显减小。可见在腔镜后面加孔径光阑可以有效地优化模式匹配,减小模式带来的误差。

表 3 不同光阑孔径下衰减时间和反射率的测量结果

Table 3 Cavity ring-down time and reflectivity at different diaphragm apertures

Diaphragm aperture / mm	$\tau / \mu\text{s}$	Error	Reflectivity / %
4	0.20185	0.00116	99.014
6	0.20137	0.0007	99.012
8	0.20219	0.00059	99.016
10	0.20356	0.00087	99.022
12	0.20455	0.00112	99.027
14	0.20492	0.00126	99.029
16	0.20489	0.00137	99.029
18	0.20487	0.0014	99.029

4 结 论

光腔衰荡法是一种高精度的反射率测量方法。根据光腔衰荡法建立了一套中红外高反射率测试实验装置,通过对腔长、望远系统的参数改变得到衰荡

曲线,计算出不同参数变化下反射率数据及其测量误差。分析了衰减曲线的模式调制现象和自再现现象,并通过在光路中插入光阑研究孔径大小优化模式匹配,减小拟合误差。说明在腔镜后面加孔径光阑可以有效地优化模式匹配,减小模式引起的衰减曲线得调制带来的误差。该测试装置还可以通过提高腔镜的反射率,改善进入腔镜的激光模式和优化模式匹配等方法来提高测试装置的精度。

参 考 文 献

- 1 A. O' Keefe, D. A. G. Decon. Cavity ringdown optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2550
- 2 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]. *光子·激光*, 2001, **12**(1): 71~73
- 3 Zhao Hongtai, Liu Xiaojun, Zhan Mingsheng. Measurement of four cavity mirrors reflectivity and absorption of the cavity with cavity ring-down spectrometer [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
- 4 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, **26**(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
- 5 Yi Hengyu, Peng Yong, Tian Xiaoqiang *et al.*. Experimental study on reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring-down method [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4): 337~339
易亨瑜,彭 勇,田小强等. 光腔衰荡法的单波长反射率测量实验研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(4): 337~339
- 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 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): 335~342
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): 335~342
- 8 R. Engeln, G. Berden, R. Peeters *et al.*. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(11): 3763~3769
- 9 Y. Le Grand, A. Le Floch. Sensitive dichroism measurements using eigenstate decay times [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(9): 1244~1246
- 10 D. Herriott, H. Kogelnik, R. Kompfner. Off-axis paths in spherical mirror interferometers[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(4): 523~526
- 11 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
- 12 D. Lee, Y. Yoon, B. Kim *et al.*. Optimization of the mode matching in pulsed cavity ringdown spectroscopy by monitoring the non-degenerate transverse mode beating[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**: 435~440