

# 中红外光参变振荡器在高反射率测量中的应用

高丽峰 熊胜明 黄 伟 孔明东

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 根据光腔衰荡光谱技术(CRDS)原理,使用中红外光参变振荡器(OPO)为光源建立了直腔与折叠腔相结合的中红外波段  $3.6\ \mu\text{m}$  反射率测量实验装置,用于研究中红外波段的高反射膜反射率,测试精度为  $10^{-4}$ 。使用直型衰荡光腔测试了三对不同薄膜材料设计镀制的高反射腔镜的反射率,并选择了一对腔镜用于实验装置中。采用该装置精确测试了不同薄膜材料镀制的高反射膜的反射率,包括  $\text{YbF}_3/\text{ZnS}$ ,  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  多层膜,以及由银加保护膜镀制的反射镜。研究表明,中红外波段介质膜的反射率可达到  $R > 0.9990$ ,其中由  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  镀制在硅基底上的多层介质膜  $3.6\ \mu\text{m}$  反射率可达到 99.96%。

**关键词** 薄膜; 反射率; 光腔衰荡光谱技术(CRDS); 检测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0151

## Mid-IR Optical Parametric Oscillator for High Reflectivity Measurement

Gao Lifeng Xiong Shengming Huang Wei Kong Mingdong

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

**Abstract** A system for measuring high reflectivity of the coating at IR wavelength ( $3.6\ \mu\text{m}$ ) by cavity ring-down spectroscopy (CRDS) with straight cavity and fold cavity has been set up. The measurement precision approximates  $10^{-4}$ . It can be used to study high reflective IR coating on mirrors. Three kinds of coatings designed for cavity mirrors have been measured with the straight cavity CRDS, and a pair of cavity mirrors have been employed in experiment. Reflectivities of mirrors deposited by  $\text{YbF}_3/\text{ZnS}$ ,  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  and Ag added with protective coating were measured. The reflectivity of the dielectric coating can reach  $R > 0.9990$ , and the reflectivity of  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  on silica substrate is 0.9996 at  $3.6\ \mu\text{m}$ .

**Key words** thin films; reflectivity; cavity ring-down spectroscopy; detection

## 1 引言

高反射率光学元件在高功率激光系统中的广泛应用使高反射薄膜元件的反射率镀制水平发展迅速,因此必须提供高反射镜的反射率精确测量结果。而传统方法(如分光光度计)无法满足高反射率的测量精度要求。光腔衰荡技术(CRDS)是一种高灵敏度吸收光谱技术,也被广泛用于精确测量高反射率。自 1988 年后<sup>[1]</sup>脉冲激光一直是 CRDS 实验使用的理想光源,而且由于脉冲激光波长范围广可调谐的优点所以应用广泛。1997 年<sup>[2]</sup>, D. Romanini 等用经过斩波的连续光也作出了衰荡吸收光谱,实现了使用连续光进行光腔衰荡实验,这标志着光腔衰荡技术已经趋于成熟。1992 年,出现了最早的使用 CRDS 测量高反射率的测量仪<sup>[3]</sup>,使用的激光器为(a CW Ti:sapphire Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),测得总损耗为  $1.6 \times 10^{-6}$ ,反射镜在红外波段 850 nm 处反射率为

$R = 0.9999984$ 。1997 年,中科院大连化物所建立了基于 CRDS 原理的反射率测量装置<sup>[4]</sup>,用激光脉冲测定了波长为 640 nm 处的反射率为 99.9788%。2006 年,中科院光电所建立了基于宽谱半导体激光器的连续光光腔衰荡装置,测量了 828 nm 的反射率<sup>[4]</sup>。由于光参变振荡器(OPO)可以在非常宽的光谱范围中获得连续可调谐的输出,本文采用 YAG 泵浦的 OPO 用 CRDS 技术建立了一套直腔与折叠腔相结合精确测试中红外波段  $3.6\ \mu\text{m}$  高反射镜反射率的实验装置,目前测试精度达到  $10^{-4}$ 。

## 2 检测原理

实验检测原理已经在文献<sup>[6]</sup>中作了详细介绍,实验装置如图 1 所示,它是由光源、望远系统 T1 和 T2、衰荡腔 M1 和 M2、以及探测器和示波器等组成。高反射率镜 M1 和 M2 构成一个光学谐振腔,

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,单色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后面的探测器可接收到激光脉冲光强的衰减信号。衰荡寿命 $\tau_0$ 定义为出射脉冲光强衰减为初始光强的 $1/e$ 时经过的时间,设两腔镜的反射率为 $R_1$ 和 $R_2$ 则

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

式中 $L$ 为腔长, $c$ 为光速。 $\alpha$ 为腔内介质吸收系数。然后将光腔折叠,引入待测反射镜,精确调谐光腔使三块镜片谐振,得到衰荡寿命 $\tau$ ,则待测镜片的反射率为:

$$R_x = \exp\left[-\left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0}\right)\frac{L}{c}\right]. \quad (2)$$

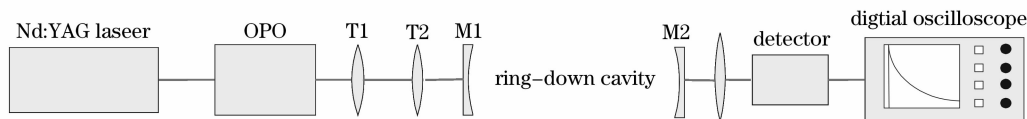


图 1 衰荡光腔实验装置图

Fig. 1 Diagram of cavity ring-down spectroscopy

### 3 实验装置中光源的分析与腔镜组合的选择

#### 3.1 光源的选择

脉冲激光是 CRDS 实验使用的理想光源。但是脉冲激光光源脉冲波动起伏影响衰荡时间的定量测量,随着 CRDS 的理论研究的发展,1996 年,对光腔内存在的复杂模式的研究<sup>[7]</sup>,才解决了这个问题。对 CRDS 实验使用的激光的最优化选择是实验的灵敏度的重要保证。线宽,脉宽,重复频率,脉冲能量,发散角等都应考虑。

##### 3.1.1 激光线宽

在腔内有吸收的情况下,应考虑激光线宽对测量结果的影响,激光的线宽必须远小于介质的吸收线宽,这时介质对光的吸收系数近似为一常数,比尔定律成立,激光的强度在腔内以指数形式衰减。如果激光的线宽大于介质的吸收线宽,则衰荡信号不再满足指数规律,比尔定律失效,这样实验按单指数规律测得的样品的反射率将小于样品真正的反射率<sup>[8]</sup>。在本实验中使用的衰荡光腔内实验环境为大气环境,所以激光光强衰减遵循单指数衰减规律。另外,若对 CRDS 进行定量分析,最好使用单模输出,窄线宽的激光器<sup>[9]</sup>。

##### 3.1.2 脉宽

脉冲的空间长度直接与脉宽相关,CRDS 腔内的光脉冲会沿着光轴反射回光源,所以,短脉冲有助于防止激光反馈回光源,使激光的波长调制更加可靠,同时也可以减少对脉冲的起伏影响。然而,实验中也不能使用最短的脉冲,因为极短脉冲与能量相同的长脉冲相比具有很高的峰值功率,可能损坏光学元件。

##### 3.1.3 发散角

衰荡光腔的衰荡寿命(一般为几微秒到几十个

微秒,光脉冲在衰荡光腔内来回反射的光程长可达数百米,这就要求入射光源的发散必须很小,否则随着光程的增加,光斑半径越来越大,当大于谐振腔镜的半径时,便会溢出透镜,使探测器探测到的能量偏小,测量得到的衰荡时间减小。对于发散角大的激光应采用光学系统对光束整形后再进入谐振腔。

##### 3.1.4 OPO 输出特性研究

图 2 是 OPO 在  $1.45 \sim 4 \mu\text{m}$  调谐范围的输出波长与能量的关系图。输出波长在  $2 \mu\text{m}$  左右时能量较高,可达到  $10\text{mJ}$ ,逐渐转动晶体改变输出波长

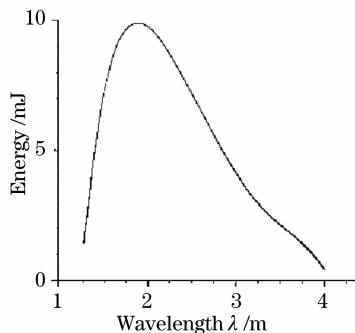


图 2 OPO 输出能量

Fig. 2 Energy output of OPO

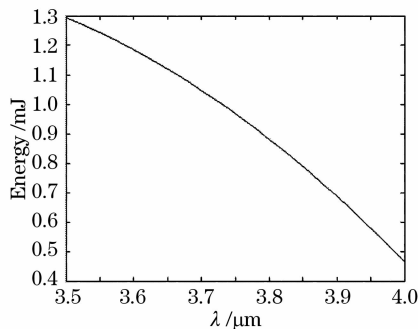


图 3 光波在  $3.5 \sim 4 \mu\text{m}$  的输出能量

Fig. 3 Energy output of laser at  $3.5 \sim 4 \mu\text{m}$

输出能量减小。这是因为在晶体切割角附近,光波的反射损失小,参与参变转换的能量高,随着晶体转角的增大,反射损耗也增大,导致输出能量减小,并且当光参变放大(OPA)闲频光逐渐增大,越来越远离简并点时,有效非线性系数不断减小,导致转换效率下降,因此闲频光波长越大,输出能量越小。图3为我们测得的波长在 $3.5\sim 4\ \mu\text{m}$ 的输出能量,波长为 $3.5\ \mu\text{m}$ 时输出能量为 $1.3\ \text{mJ}$ ,当转动KTA晶体到波长为 $4.0\ \mu\text{m}$ 时输出能量只有 $0.43\ \text{mJ}$ 。

### 3.2 腔镜选择实验

腔镜为中科院成都光电所镀制的高反射镜;探测器为ZnHgGeTe探测器,响应时间 $0.5\ \text{ns}$ ;信号记录采用TEK公司 $500\ \text{MHz}$ 数字存储示波器。将

表1 各组腔镜在各个不同腔长下的反射率测量结果以及测量的均方根误差

Table 1 Measured reflectivity of cavity mirror at different cavity lengths and root-mean-error (RMS)

Cavity length /cm	30	40	50	60	70	$\Delta R$	RMS
R(1#2#) (ZnS/YbF <sub>3</sub> )	0.9902	0.9903	0.9900	0.9900	0.9903	$3.0\times 10^{-4}$	$1.35\times 10^{-4}$
R(3#4#) (ZnS/YbF <sub>3</sub> )	0.99790	0.99795	0.99789	0.99776	0.99773	$2.2\times 10^{-4}$	$8.55\times 10^{-5}$
R(5#6#) (ZnSe/YbF <sub>3</sub> )	0.99877	0.99887	0.99896	0.99882	0.99888	$2.1\times 10^{-4}$	$6.35\times 10^{-5}$

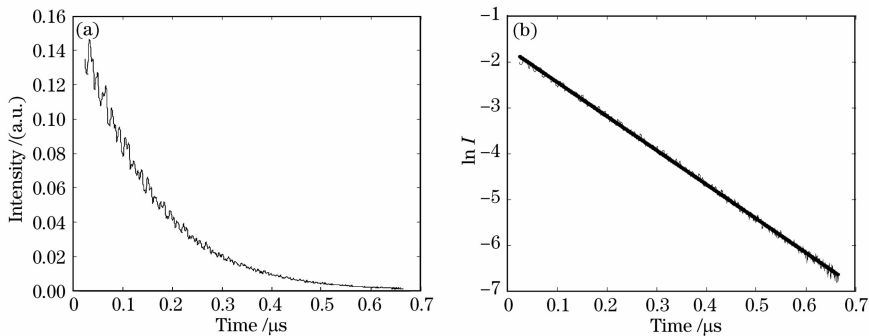


图4 (a)腔镜1#2#组合的光腔衰荡曲线, (b)衰荡曲线的对数曲线

Fig. 4 Curve of cavity ring-down for cavity 1#2#, (b) dialogical curve of cavity ring-down

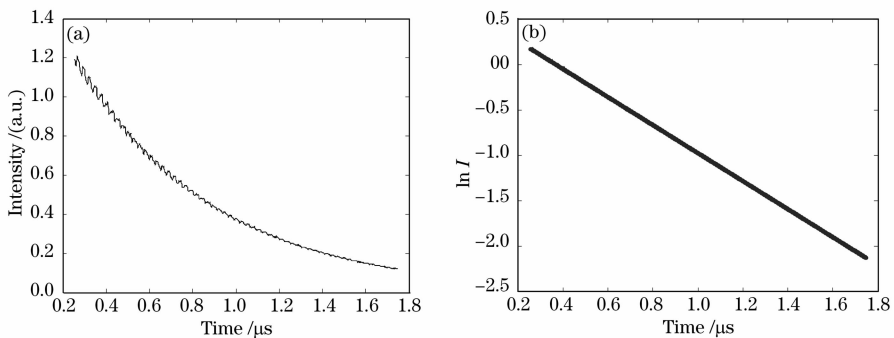


图5 腔镜3#4#组合的光腔衰荡曲线, (b)衰荡曲线的对数曲线

Fig. 5 Curve of cavity ring-down for cavity 3#4#, (b) dialogical curve of cavity ring-down

我们分别给出了每对腔镜在直腔腔长为 $0.4\ \text{m}$ 时得到的衰减曲线及其对数曲线。如图4所示为腔镜1#2#组合的衰减曲线和对数曲线。如图5所示为腔镜3#4#组合的衰减曲线和对数曲线。如图6所示为腔镜5#6#组合的衰减曲线和对数曲

数据采集到计算机进行分析。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。在实验中我们加工了3对腔镜,均为凹面曲率半径为 $1\ \text{m}$ 的GaF<sub>2</sub>基底平凹镜,凹面上分别使用ZnS/YbF<sub>3</sub>以及ZnSe/YbF<sub>3</sub>镀制不同膜堆的反射膜,在膜系镀制中控制各组衰荡腔镜的反射率的高低,每一对都是同罩镀制的反射率相等的镜子。用这三对腔镜分别组成直型衰荡腔做光腔衰荡实验,即使用同罩镀制的腔镜1#2#组合,同罩镀制的腔镜3#4#组合,同罩镀制的腔镜5#6#组合分别进行不同腔长下的光腔衰荡测试,测得各组腔镜在各个不同腔长下的反射率测量结果以及测量的均方根误差如表1所示。

线。在实验中发现,使用腔镜3#4#组合,得到的衰减曲线光滑,拟合误差小,可配合激光器的能量输出和探测器的探测能力使用。使用腔镜1#2#组合反射率低,测量的系统误差大。如表2所示为各组腔镜的反射率测量结果。

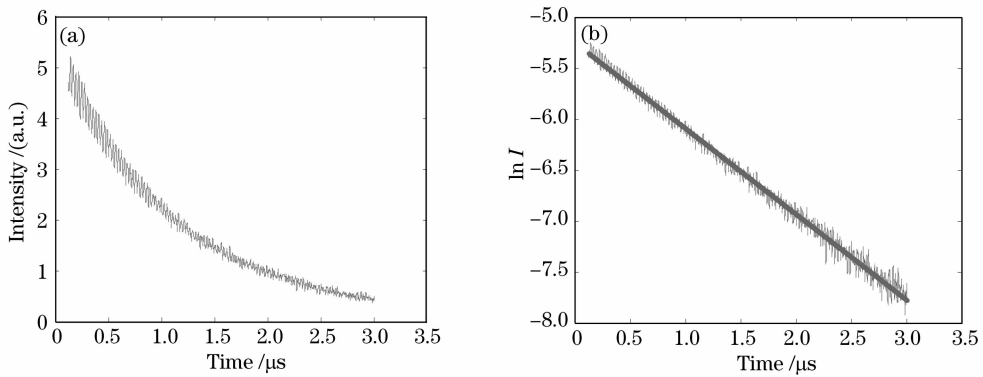


图 6 (a)腔镜 5#6#组合的光腔衰荡曲线, (b)衰减曲线的对数曲线

Fig. 6 (a) Curve of cavity ring-down for cavity 5#6#, (b) dialogical curve of cavity ring-down

表 2 三组腔镜的反射率测量结果

Table 2 Measured reflectivity of tree pairs of caivity mirrors

	Data number	Ring-down time	Reflectivity
Cavity mirror 1#2# (ZnS)	060331_112316	0.1362±0.00107	99.030%
Cavity mirror 3#4# (ZnS)	060810_165459	0.6475±0.0042	99.795%
Cavity mirror 5#6# (ZnSe)	060815_152758	1.1888±0.00792	99.887%

## 4 使用测量装置测量不同膜系样品的分析

根据实验,我们选择了腔镜 3#4#组合,利用直腔和折叠腔组合的方式测量不同基底,不同薄膜材料镀制的多层介质高反射膜的在  $3.6 \mu\text{m}$  处的反射率,包括  $\text{YbF}_3/\text{ZnS}$ ,  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  多层四分之一常规膜,以及由银加保护膜镀制的金属反射镜在  $3.6 \mu\text{m}$  处的反射率。测量结果如下表。

表 3 不同膜系反射率测量结果

Table 3 Measured reflectivity of different coatings

Coating materiel	Reflectivity
ZnS/YbF <sub>3</sub>	0.9993
ZnSe/YbF <sub>3</sub>	0.9996
Ag+protect film	0.982

## 5 结 论

本文根据建立的中红外高反射率测量装置测量了三组腔镜和一些高反射膜的反射率,这些研究结果表明,在中红外波段介质膜的反射率可达到  $R > 0.9990$ ,其中由  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$  镀制在硅基底上的多层介质膜  $3.6 \mu\text{m}$  反射率可达到 99.96%。此外本文对采用 CRDS 作高反射率的测试的激光器在线宽,脉宽,发散角这些选择条件方面作了分析。此外,在 CRDS 实验中,如果是单纵模激发腔,则衰荡曲线呈现单指数衰减形式,CRD 光谱的测试灵敏度将会提高<sup>[10]</sup>。

## 参 考 文 献

- O'Keefe A., Decon D. A. G.. Cavity ringdown optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2550
- Rominini D., Kachanov A A., Sadeghi N. CW cavity ringdown spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **264**: 316~321
- Rempe G., Thompson R J., Kimble H J *et al.*. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 363~365
- Sun Fuge, Sun Long, Dai Dongxu *et al.*. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **26**(1): 35~38  
孙福革, 孙 龙, 戴东旭 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, **26**(1): 35~38
- Gong Yuan, Li Bincheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity[J]. *Chin. 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[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1247~1250
- Gao Lifeng, Xiong Shengming, Li Bincheng *et al.*. The analyse 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
- Kevin K. Lehmann, D. Romanini. The superposition principle and cavity ring-down spectroscopy[J]. *Chem. Phys.*, 1996, **105**(23): 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. 光腔衰荡法测定腔镜及镜片的反射率[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(1): 71~73
- Chen Hongbing, Gao Junyi, Zhou Jingang *et al.*. Experimental study on the complicated mode beating effects of ring-down cavity[J]. *Acta Optica Ainnica*, 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
- Hodges J T, Looney J P, van Zee R D. Response of a ring-down cavity to an arbitrary excitation[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**: 4112~4122