

# 氧碘腔镜高反射率测量系统及不确定度分析

张 政 任伟艳 张世强

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 氧碘腔镜作为氧碘化学激光器重要组成部分, 氧碘腔镜反射率的高低制约氧碘化学激光器功率的提高, 必须对氧碘腔镜反射率进行精确测试。基于光腔衰荡光谱法搭建的氧碘腔镜高反射率测量系统测量精度高, 氧碘腔镜中  $45^\circ$  全反镜反射率测试结果为 99.979%。搭建的氧碘腔镜高反射率测量系统的不确定度主要由衰荡腔腔长、腔镜衰荡时间和待测镜衰荡时间时间确定。其中衰荡曲线最大幅值点的选取和测量重复性对测量结果的不确定度影响较大, 在对衰荡曲线的处理过程中, 应该注意选取合适的幅值点。通过对氧碘腔镜高反射率测量系统不确定度分析, 得出扩展不确定度为 0.0152%。

**关键词** 激光器; 氧碘化学激光器; 反射率; 腔镜; 不确定度

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201542.s102002

## Uncertainty Analysis of Measurement System for the High Reflectivity of Chemical Oxygen Iodine Laser Mirrors

Zhang Zheng Ren Weiyan Zhang Shiqiang

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** Chemical oxygen iodine Laser (COIL) power is restricted by the reflectivity of COIL mirrors who are important parts of COIL, so the reflectivity of COIL mirrors must be tested precisely. The precision of measurement system is high for the high reflectivity of COIL mirrors based on cavity ring-down spectroscopy, the reflectivity for an  $45^\circ$  optical mirror of COIL mirrors is 99.979%. Uncertainty of measurement system for the high reflectivity of COIL mirrors are based on cavity ring-down length, cavity mirrors ring-down time and tested mirrors ring-down time. By studying the vertex of curve ring-down and tests repetition, it is found that vertex of curve and tests repetition are sensitive. When ring-down curve is managed, the vertex of curve is properly choosed. Uncertainty analysis of measurement system for the high reflectivity of COIL mirrors has been done, expanded uncertainty is 0.0152%.

**Key words** lasers; chemical oxygen iodine laser; reflectivity; cavity mirror; uncertainty

**OCIS codes** 140.1550; 140.3410; 300.6360

## 1 引 言

氧碘激光高反镜是实现氧碘激光产生的关键部件, 在实际使用中, 由于膜层老化、激光长期辐照等原因会导致反射率降低, 造成激光器输出功率下降<sup>[1]</sup>, 因此需对反射率降低的高反镜重新镀膜并对镀膜后高反镜进行测试。目前国内镀制的氧碘激光高反膜的反射率已达到 99% 以上, 对于如此高的反射率, 传统的单多次反射法、光透射法等, 给出的结果已不再准确, 目前公认采用的方法是光腔衰荡光谱法。文献[2-4]对衰荡腔的腔型和腔镜倾斜进行了研究, 文献[5-6]对测试的重复性和数据点的截取进行了研究, 而对于光腔衰荡光谱法测量反射率的不确定度分析前人还没有进行论述。可能是对于反射率测试工作中, 没有对反射率的测试结果提出较高的要求。

通过对氧碘腔镜高反射率测量系统的细致分析, 本文严格采用不确定度分析方法, 对于反射率测试不确

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家重点实验室基金(SKLLIM1204)

作者简介: 张 政(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: zhangzqzheng@163.com

定度来源分为三类:衰荡腔腔长测量不确定度、腔镜衰荡时间测量不确定度和待测镜衰荡时间测量不确定度。计算得到碘腔镜高反射率测量系统扩展不确定度为 0.0152%。

## 2 实验原理

光腔衰荡光谱法原理如图 1 所示。采用光腔衰荡光谱法的测量系统通常由光源、衰荡光腔、数据采集和处理三个部分构成。腔镜 M1、M2 构成一个光学谐振腔, M1、M2 反射率一般要求在 99% 以上, 设腔镜 M1、M2 反射率分别为  $R_1$ 、 $R_2$ , 进入衰荡腔内的光脉冲的初始能量为  $I_0$ , 谐振腔内光脉冲能量随时间的衰减可表示为

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right), \quad (1)$$

若不考虑腔内吸收等其他损耗,  $\tau$  完全由腔镜反射率  $R_1$ 、 $R_2$  决定。  $\tau$  可表示为

$$\tau = \left[ \frac{t_r}{\ln(R_1 R_2)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中  $t_r$  为光在腔内往返一周所需的时间, 即  $t_r = 2L/c$ ,  $L$  为谐振腔腔长,  $c$  为光速。

从(1)式可知,  $\tau$  表示光脉冲能量下降到初始值  $I_0$  的  $1/e$  所用时间, 假设腔镜反射率  $R_1$ 、 $R_2$  相等, 通过测出  $\tau$  即可计算出腔镜反射率的  $R_1$ 、 $R_2$  值。

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = \exp\left(-\frac{t_r}{2\tau}\right). \quad (3)$$

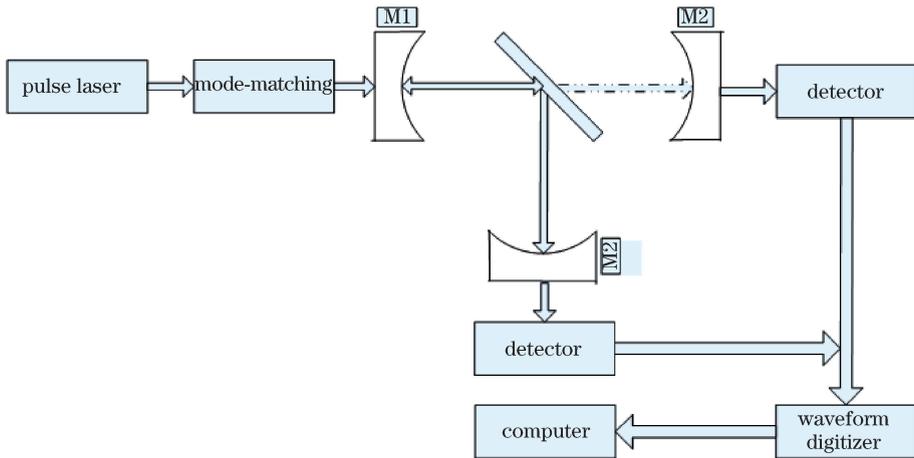


图 1 光腔衰荡光谱法原理图

Fig. 1 Schematic of cavity ring-down spectroscopy

因此, 实际测量过程分两个步骤, 首先用直型腔对腔镜反射率  $R_1$ 、 $R_2$  标定, 然后采用折迭腔对待测镜的反射率进行测量。被测镜面的反射率可描述为

$$R = \exp\left[\frac{L}{c} \left( \frac{1}{\tau_0} - \frac{1}{\tau} \right)\right], \quad (4)$$

式中  $\tau_0$  为直型腔的衰荡时间,  $\tau$  为折叠腔的衰荡时间。

## 3 实验装置

反射率测量系统如图 2 和图 3 所示, 主要由光源、衰荡腔、探测器、示波器和计算机组成。光源采用 IRRB-1319 型灯押运脉冲固体激光器, 输出波长的  $1.319 \mu\text{m}$ , 能量为  $15.6 \text{ mJ}$ , 脉宽为  $7 \text{ ns}$ 。腔镜为中国科学院大连化学物理研究所镀制的凹面高反射镜, 曲率半径为  $0.6 \text{ m}$ , 反射率为  $99.95\%$ ; 探测器使用 Thorlabs 公司的 Det410 型 InGaAs 探测器, 响应时间为  $1 \text{ ns}$ , 探测直径为  $1 \text{ mm}$ ; 信号记录采用 TDS3044B 型数字示波器, 模拟带宽为  $400 \text{ MHz}$ 。实验中采用  $1.2 \text{ mW He-Ne}$  激光作为导引光进行衰荡腔调节。

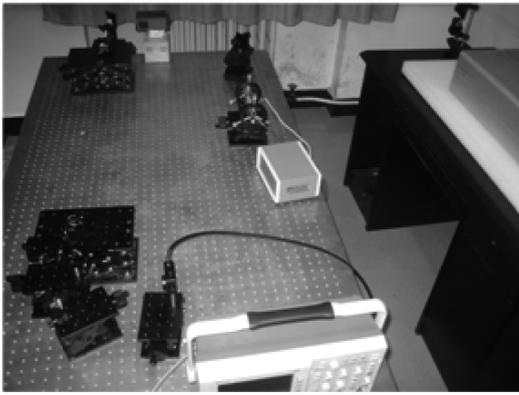


图 2 测量腔镜反射率的直型腔

Fig. 2 Measurement reflectivity of straight cavity ring-down spectroscopy

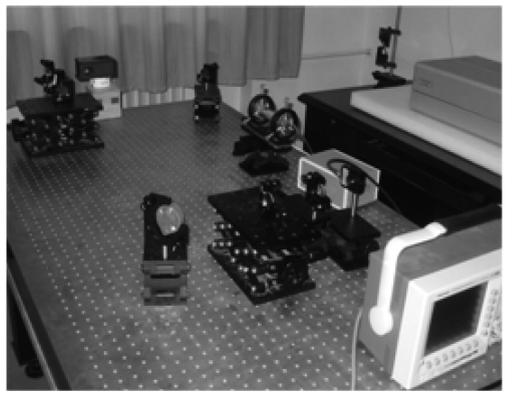


图 3 测量被测镜反射率的折叠腔

Fig. 3 Measurement reflectivity of folded cavity ring-down spectroscopy

## 4 实验结果

对测量光路进行反复调试,激光脉冲可在两面  $0^\circ$ 凹面高反镜之间建立起振荡,采用同轴 He-Ne 激光精细调整谐振腔,即可在示波器上得此衰荡光腔的衰荡曲线,由此得到光腔的实际衰荡寿命,取相同腔长的折叠腔,测量置于折点处的待测高反镜,以同样的方法调整三面镜片构成谐振腔,测得衰荡光腔的衰荡寿命,根据(4)式计算出待测样品的反射率。

用前述腔镜构成腔长 1200 mm 的直型腔,图 4 为一次测量中得到的衰荡曲线。对衰荡曲线进行指数拟合,可得本次测量的衰荡时间为  $6.3506 \mu\text{s}$ 。

保持腔长不变,将光腔改为折叠腔,在光束转折处插入氧碘激光器  $45^\circ$ 全反镜,相同情况下进行 10 次测量,图 5 为测量中得到的某一次衰荡曲线。截取衰荡曲线进行指数拟合。表 1 为 10 次测量所得衰荡时间,由(4)式计算可得该  $45^\circ$ 全反镜的反射率为 99.979%。

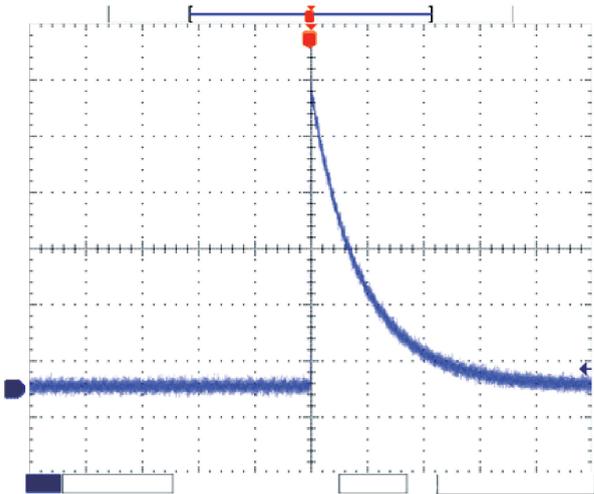


图 4 直型腔衰荡曲线

Fig. 4 Decay curve of the straight cavity

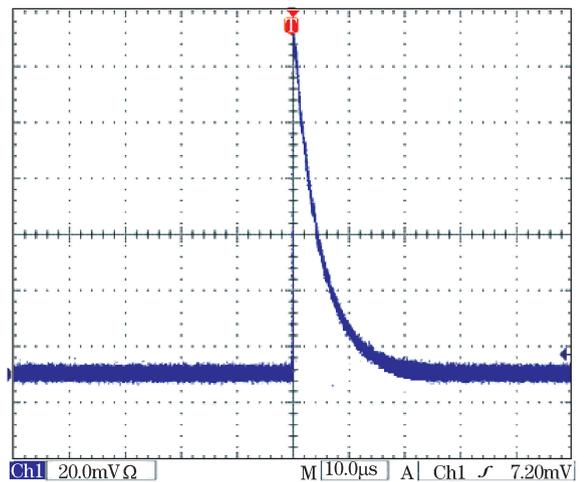


图 5 折叠腔衰荡曲线

Fig. 5 Decay curve of the folded cavity

## 5 反射率测量不确定度分析

### 5.1 反射率测量不确定度来源

根据光腔衰荡法测量反射率原理及测量系统布局,反射率测量不确定度  $u_R$  来源如图 6 所示,主要包括以下三个方面:1)衰荡腔腔长测量不确定度  $u_1$ ;2)腔镜衰荡时间测量不确定度  $u_2$ ;3)待测镜衰荡时间测量不确定度  $u_3$ 。

表 1 衰荡时间测量结果  
Table 1 Test results of ring-down time

Number	Straight cavity ring-down time/ $\mu\text{s}$	Folded cavity ring-down time/ $\mu\text{s}$
1	6.3404	4.48770
2	6.3189	4.70222
3	6.3273	4.56802
4	6.3506	4.50891
5	6.3422	4.48438
6	6.3251	4.46051
7	6.3762	4.47928
8	6.4017	4.69755
9	6.3892	4.66223
10	6.3928	4.48858
Average value/ $\mu\text{s}$	6.3564	4.5539

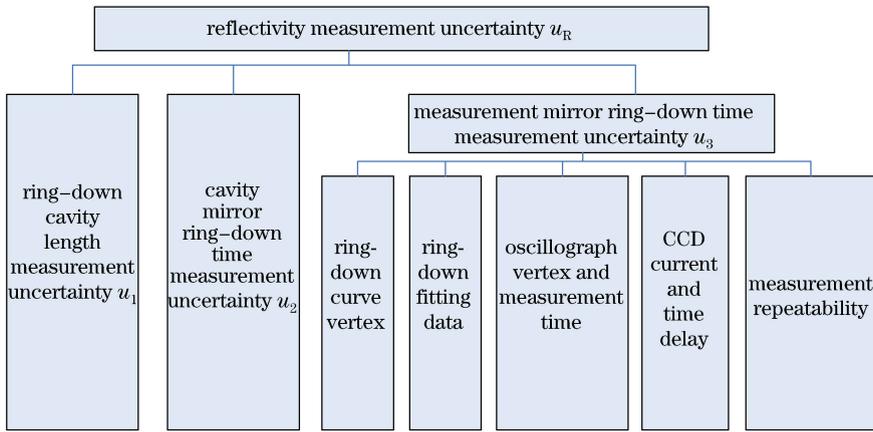


图 6 反射率测量不确定度来源

Fig. 6 Uncertainty source of reflectivity measurement

## 5.2 不确定度分析

### 5.2.1 衰荡腔腔长测量不确定度

衰荡腔腔长测量不确定度的来源主要由腔长测量设备引入。测量距离为 1 m, 米尺的示值误差为  $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。按照均匀分布, 腔长测量的标准不确定度为

$$u_1 = 0.5 / \sqrt{3} \approx 0.2887 \text{ mm}. \quad (5)$$

### 5.2.2 腔镜衰荡时间测量不确定度

根据镀膜单位提供的测试报告, 腔镜衰荡时间测量不确定度  $u_2$  为  $0.028 \mu\text{s}$ 。

### 5.2.3 待测镜衰荡时间测量不确定度

待测镜衰荡时间测量不确定度来源主要是衰荡曲线最大幅值选取引入的不确定度、衰荡曲线拟合不确定度、示波器幅值拟合到衰荡时间引入的不确定度、示波器时间测量不确定度、光电探测器输出电流信号引入的不确定度、光电探测器时间延迟引入的不确定度, 测量重复性引入的不确定度。

#### 1) 衰荡曲线最大幅值选取引入的不确定度 $u_{31}$

对同一条衰荡曲线, 在曲线的头部选取 10 个点作为最大幅值截取衰荡曲线, 拟合得到的衰荡时间见表 2。

表 2 衰荡曲线截取后衰荡时间拟合结果

Table 2 Fitting results for ring-down time after intercept ring-down curve

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ring-down time $\tau / \mu\text{s}$	4.56570	4.54632	4.55103	4.51521	4.52960	4.48084	4.48362	4.49056	4.47169	4.50936

计算可得由最大幅值选取引入的不确定:

$$u_{31} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \left[ \sum_{k=1}^n (\tau_k - \bar{\tau})^2 \right]} = 0.0329 \mu\text{s}. \quad (6)$$

2) 衰荡曲线拟合不确定度  $u_{32}$

利用数据分析软件 Origin8.0 对一次测量所得的衰荡曲线进行一阶指数衰减拟合, 数据点与拟合函数的标准偏差为  $2.316 \times 10^{-6}$ 。与  $u_{31}$  相比, 该值为小量, 可忽略。

3) 示波器幅值拟合到衰荡时间引入的不确定度  $u_{33}$

拟合得到的幅值  $V$  与时间  $t$  的关系为

$$V = 0.12867 \exp[-t/(4.5089 \times 10^{-6})]. \quad (7)$$

由示波器标校证书, 幅度量程为  $20.0 \text{ mV/div}$  时, 校准结果的不确定度  $u_v$  为  $0.2\%$ 。计算得到示波器幅值拟合到衰荡时间引入的不确定度

$$u_{33} = \frac{\partial t}{\partial V} u_v = 0.009 \times 10^{-6}, \quad (8)$$

$u_{33}$  与  $u_{31}$  相比为小量, 可忽略。

4) 示波器时间测量不确定度  $u_{34}$

由示波器标校证书, 时间量程为  $10 \mu\text{s}$  时, 校准结果的不确定度为  $0.045\%$ 。按照均匀分布, 时间测量的不确定度  $u_{34}$  为  $0.026\% \mu\text{s}$ 。

5) 光电探测器输出电信号引入的不确定度  $u_{35}$

光电探测器接收衰荡腔输出光信号后, 将其转化为电信号进入示波器, 电信号的强弱表现为示波器的输出幅值。因此光电探测器输出电信号引入的不确定度也可由示波器幅值拟合到衰荡时间引入的不确定度表示。根据技术说明书, 测量系统中所用光电探测器输出电信号的标准不确定度为  $0.5\%$ , 将其等同为示波器幅值不确定度, 计算可得光电探测器输出电信号引入的不确定度  $u_{35}$  为

$$u_{35} = \frac{\partial t}{\partial V} u_v = 0.0225 \times 10^{-6}, \quad (9)$$

$u_{35}$  与  $u_{31}$  相比为小量, 可忽略。

6) 光电探测器时间延迟引入的不确定度  $u_{36}$

根据技术说明书, 光电探测器时间延迟约为  $7 \text{ ns}$ , 而待测衰荡时间在微秒量级, 因此由延迟时间引入的不确定度可以忽略。

7) 测量重复性引入的不确定度  $u_{37}$

在相同测量条件下进行 10 次测量, 对测量得到的衰荡曲线进行拟合, 所得的衰荡时间见表 3。

表 3 相同测量条件下衰荡时间拟合结果

Table 3 Fitting results for ring-down time in the same condition

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ring-down time $\tau/\mu\text{s}$	4.48770	4.70222	4.56802	4.50891	4.48438	4.46051	4.47928	4.69755	4.66223	4.48858

则计算可得测量重复性引入的不确定度  $u_{37}$ :

$$u_{37} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[ \sum_{k=1}^n (\tau_k - \bar{\tau})^2 \right]} = 0.0968 \mu\text{s}. \quad (10)$$

综合以上分析, 可得待测镜衰荡时间的合成标准不确定度  $u_3$  为

$$u_3 = \sqrt{u_{31}^2 + u_{34}^2 + u_{37}^2} = 0.1022 \mu\text{s}. \quad (11)$$

#### 5.2.4 反射率测量合成不确定度

根据(4)式, 反射率测量的合成标准不确定度  $u_R$  为

$$u_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial L}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau_0}\right)^2 u_2^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \tau}\right)^2 u_3^2} = 0.0076\%, \quad (12)$$

扩展不确定度  $U$  为

$$U = 2u_R = 0.0152\% \quad (13)$$

## 6 结 论

基于光腔衰荡光谱法测量反射率精度很高,适合高反镜反射率的测试。搭建的氧碘腔镜高反射率测量系统的不确定度主要由衰荡腔腔长、腔镜衰荡时间和待测镜衰荡时间时间确定。其中衰荡曲线最大幅值点的选取和测量重复性对测量结果的不确定度影响较大,在对衰荡曲线的处理过程中,应该注意选取合适的幅值点。通过对氧碘腔镜高反射率测量系统不确定度分析,得出扩展不确定度为 0.0152%。在对具体的高反射率测试系统进行分析时,不同的测试设备要具体分析,才能得到系统的不确定度。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Zheng, Ren Weiyan, Guan Xiaowei. Experimental investigation on power stabilization of chemical oxygen iodine laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s114004.  
张 政,任伟艳,关小伟. 氧碘化学激光器功率稳定性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s114004.
- 2 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai. Analysis of cavity mirrors tilt in ring-down cavity[J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 5-8  
易亨瑜,吕百达,张 凯. 衰荡光腔中腔镜倾斜分析[J]. 激光技术, 2006, 30(1): 5-8.
- 3 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai. Choosing cavity parameters in cavity ring-down method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(4): 523-527.  
易亨瑜,吕百达,张 凯. 衰荡腔测量中的腔参数选择[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 523-527.
- 4 Yi Hengyu. Misalignment simulation of cavity ring-down waveform[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(3): 399-404.  
易亨瑜. 衰荡腔失调下的波形仿真[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 399-404.
- 5 Gao Lifeng, Xiong Shengming, Li Bincheng, *et al.*. The research of high reflectivity measurement by cavity ring-down spectroscopy[J]. Optical Instruments, 2005, 27(3): 78-81.  
高丽峰,熊胜明,李斌成,等. 用光腔衰荡法测量高反射率的重复性测试[J]. 光学仪器, 2005, 27(3): 78-81.
- 6 Wang Li, Cheng Xinbin, Wang Zhanshan, *et al.*. Influence of fitting data number on measurement of reflection based on cavity ring-down [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 871-873.  
王 利,程鑫彬,王占山,等. 数据拟合点的截取对光腔衰荡法测量反射率的影响[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 871-873.

栏目编辑: 何卓铭