

## 激光与光电子学进展

## 基于腔损耗扫描寻优的光腔衰荡高反射率测量

田中州<sup>1,2,3</sup>, 何星<sup>1,2,3\*\*</sup>, 王帅<sup>1,2,3</sup>, 杨平<sup>1,2,3</sup>, 许冰<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对目前腔失调参数与腔损耗之间的映射关系并不明确, 调控过程中腔相对失调量亦不明晰等问题, 提出一种基于腔失调参数扫描的腔损耗寻优调控方法。该方法通过腔镜倾斜调节量的扫描寻优, 以光腔衰荡时间为判据寻找初始腔和测试腔相对失调优化的腔状态。实验结果表明: 通过该方法, 对同一高反射率待测样品 6 次实验测量结果的测量重复性精度相比传统方法由  $1.26 \times 10^{-4}$  提高到约  $9.83 \times 10^{-6}$ , 测量重复性峰谷值由  $3.25 \times 10^{-4}$  提高到  $2.7 \times 10^{-5}$ , 测量结果更稳定, 表明该方法能获得腔参数相对失调更小的调控状态, 为在初始腔反射率较低的光腔衰荡测量系统中抑制衰荡腔相对失调提供了一种解决方案。

**关键词** 测量; 光腔衰荡; 高反射率测量; 腔损耗寻优; 基横模

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220640

## High Reflectivity Measurement Based on the Intracavity Loss Scanning of Ring-Down Cavity

Tian Zhongzhou<sup>1,2,3</sup>, He Xing<sup>1,2,3\*\*</sup>, Wang Shuai<sup>1,2,3</sup>, Yang Ping<sup>1,2,3</sup>, Xu Bing<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the problem that the mapping relation between cavity misalignment parameters and cavity loss is unclear, and the relative cavity offset is not clear during the cavity tuning process, this study proposes a cavity loss optimization method based on cavity misalignment parameter scanning. In this method, the scanning optimization of the tilt adjustment of the cavity mirror was carried out. Similarly, the optimized cavity state of the relative misalignment between the initial cavity and test cavity was determined based on the ring-down time of the optical cavity. The experimental results reveal that there is an improvement in the measurement repeatability accuracy of the six experimental measurement results of the same high reflectivity sample, from  $1.26 \times 10^{-4}$  to  $9.83 \times 10^{-6}$ . Furthermore, the measurement repeatability peak-to-valley value increases from  $3.25 \times 10^{-4}$  to  $2.7 \times 10^{-5}$  compared with the traditional method. Thus, the results verify that the proposed method can obtain a cavity tuning state with less relative cavity misalignment, which improves the optical cavity ring-down measurement system with low-initial cavity reflectivity.

**Key words** measurement; ring-down cavity; high reflectivity measurement; cavity loss optimization; fundamental transverse mode

## 1 引言

光腔衰荡技术<sup>[1]</sup>是一种基于高精度无源谐振腔(衰荡腔)的光学探测技术<sup>[2]</sup>, 广泛应用于高反射率测量<sup>[3-4]</sup>、痕量气体检测<sup>[5]</sup>、气体吸收谱分析及光纤传感<sup>[6]</sup>

等领域, 是目前在以上技术领域测量精度最高的方法。以高反射率测量为例, 其基本工作流程为: 1) 获取初始衰荡腔(简称初始腔)腔损耗大小; 2) 将待测镜片作为腔镜引入衰荡腔内(此时构成测试腔), 通过监测腔损耗变化量即可计算待测镜片反射率。因此, 该

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-01-26; 录用日期: 2022-01-28; 网络首发日期: 2022-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61805251, 61875203, 11811530290, 11704382)、中国科学院青年创新促进会(2017429)

通信作者: \*bing\_xu\_ioe@163.com; \*\*hexingjiayou@126.com

技术要求初始腔和测试腔之间的腔损耗相对变化只与待测对象有关。然而,腔损耗对腔参数失调极为敏感。在腔结构转换中,如若初始腔和测试腔失调程度不同,则腔损耗变化量将包含衰荡腔相对失调的影响,进而导致测量准确性和可靠性下降。因此,抑制衰荡腔参数相对失调对于高反射率精密测量极为重要。

针对这一问题,多年来研究人员发展了一系列调控判据和方法。这些方法主要基于衰荡腔透射信号的强度信息,如光强峰值<sup>[7]</sup>、光强峰值包络线<sup>[8]</sup>等。上述判据目前量化精度不高,依赖人工辅助判断,具备一定的经验门槛。为此,何星<sup>[9]</sup>基于腔失调时的高阶横模激发现象,通过同时监测衰荡腔透射信号的强度峰值和强度分布(光斑形态),增强了对腔失调状态的感知能力。但该方法的光斑形态辨识过程算法复杂、运算量大。于是,薛颖等<sup>[10-11]</sup>提出更简单高效的光斑形态量化算法,以透射光斑外接矩形宽高比及光斑与其外接矩形面积比作为综合调控判据。但近期我们在实验中发现,基横模状态下对应的腔状态并不唯一。在一定的失调量下,腔透射信号的强度峰值和强度分布可能十分接近,但腔损耗大小却明显改变,这就意味着在现有调控判据下仍然存在腔相对失调的可能性,腔相对失调就会影响到腔损耗测量值,进而影响测量结果的可靠性和真实性。

为保证测量结果的可靠性与稳定性,直观获取腔失调对腔损耗的影响关系,本文提出一种基于腔损耗扫描寻优的调控方法。首先,调节衰荡腔至基横模状态,并精调透射信号直至光强达到峰值<sup>[10]</sup>,然后,以此为起点,在基横模状态下,对某一腔镜进行水平和垂直方向二维扫描调控,获取腔失调参数与腔损耗的映射关系,通过初始腔和测试腔优化的腔损耗来计算待测样品反射率。实验结果表明,相比于传统方法,该方法对同一高反射率待测样品 6 次实验测量结果的测量重复性精度由  $1.26 \times 10^{-4}$  提高到约  $9.83 \times 10^{-6}$ ,测量重复性峰谷(PV)值由  $3.25 \times 10^{-4}$  提高到  $2.7 \times 10^{-5}$ 。

## 2 基本原理

### 2.1 光腔衰荡高反射率测量技术原理

光腔衰荡系统结构(以直形腔为例)如图 1 所示,系统核心硬件由激光器、衰荡腔、光电探测器和信号处理与控制部分组成。衰荡腔通常为双凹腔或平凹腔结构。

在  $t=0$  时刻向腔内注入一束脉冲能量,若入射激光与衰荡腔满足模式匹配,则会激发谐振信号。衰荡腔透射光强遵循  $e$  指数衰减规律<sup>[12]</sup>,可表示为

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau), \quad t > 0, \quad (1)$$

式中: $I$ 表示衰荡腔透射光强; $I_0$ 表示  $t=0$  时刻的透射光强; $\tau$ 为光腔衰荡时间,定义为透射光强从  $I_0$  衰减到  $I_0$  的  $1/e$  所需的时间。光腔衰荡时间与腔损耗的关系可

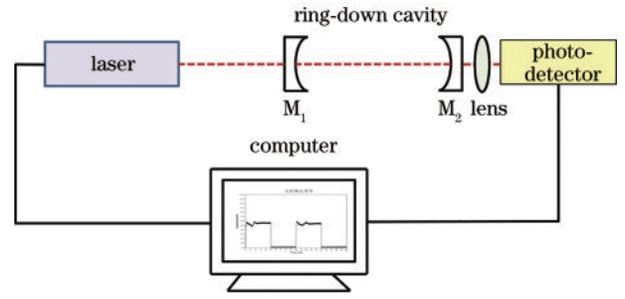


图 1 光腔衰荡系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of optical cavity ring-down system

表示为

$$\delta = \frac{L}{\tau c}, \quad (2)$$

式中: $\delta$ 为腔损耗; $L$ 为腔长; $c$ 为光速。若腔内无吸收介质,则可得腔镜平均反射率为

$$R = \sqrt{R_1 R_2} = 1 - \delta, \quad (3)$$

式中: $R_1$ 、 $R_2$ 分别为腔镜  $M_1$ 、 $M_2$  的反射率。

在图 1 所示的直型腔(初始腔)中插入待测镜片  $M_3$  构成折叠腔[测试腔,见图 2(b)],分别测量两种腔的衰荡时间  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  并计算出相应的腔损耗大小<sup>[10]</sup>,则待测镜片反射率  $R_3$  可表示为

$$R_3 = \exp(\delta_1 - \delta_2), \quad (4)$$

式中: $\delta_1$ 为初始腔的腔损耗; $\delta_2$ 为测试腔的腔损耗。根据国家标准 GB/T 37412—2019, $R_3$  的测量相对误差可表示为<sup>[13]</sup>

$$\left| \frac{\Delta R_3}{R_3} \right| = \left| \frac{\Delta R}{R} \right| + (1 - RR_3) \left( \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta \tau_2}{\tau_2} \right| \right). \quad (5)$$

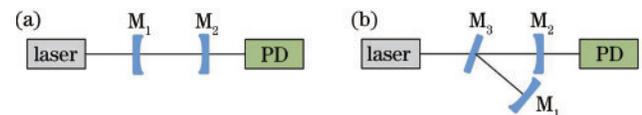


图 2 光腔衰荡技术原理图。(a)初始腔;(b)测试腔

Fig. 2 Schematic diagram of the optical cavity ring-down technique. (a) Initial cavity; (b) measured cavity

### 2.2 腔损耗与腔失调映射关系分析

由上述原理可知,为保证测量结果准确可靠,腔相对损耗量应只由待测样品引起。然而,腔结构转换过程中,腔参数(腔镜偏移、腔镜倾斜等)相对失调难以避免,进而造成腔相对损耗测量误差,影响测量结果。控制腔内运行模式保持在基横模状态有利于减小腔相对损耗测量误差,提高该测量技术的稳定性和可靠性<sup>[10]</sup>。但在实验中发现,若某一腔镜超调导致模式偏离基横模到一阶模时,用另一腔镜仍可把模式调回至基横模,即存在至少两种腔镜状态均对应基横模模式。如表 1 所示,两种腔状态在腔透射信号达到光强峰值时对应的腔损耗观测值相差约  $1.74 \times 10^{-4}$ ,这表明对同一样品的两次测量中,若初始腔分别处于这两种状态,反射率测量结果将存在约  $1.74 \times 10^{-4}$  的差异。

表 1 基横模下的两种腔镜状态比较

Table 1 Comparison of two cavity mirror states in fundamental transverse mode

Mirror position	M <sub>1</sub> / (°)		M <sub>2</sub> / (°)		τ / μs	δ / 10 <sup>-6</sup>
	horizontal	vertical	horizontal	vertical		
Position 1	0	0	0	0	1.259 ± 0.010	1427
Position 2	0.01 <sup>▲</sup>	0.0025 <sup>▲</sup>	-0.0175 <sup>▲</sup>	0.0175 <sup>▲</sup>	1.434 ± 0.007	1253

(notes: ▲ represents the tilt angle compared to position 1)

基横模状态下存在多个不同腔损耗大小的腔状态增大了腔相对失调的概率。因此,为获取腔相对失调更小的腔状态,有必要开展腔失调与腔损耗量之间映射关系的研究。2016年 Cui 等<sup>[14]</sup>在腔镜倾斜单维度扫描实验中发现了腔损耗随腔镜倾斜角增加(由 0 至 300 μrad)呈先减小后增大的趋势,揭示了腔损耗与腔失调之间可能存在复杂的非线性关系。2020年 Telfah 等<sup>[15]</sup>通过光腔衰荡技术调控过程的研究表明了腔损耗与腔失调之间多极值现象的存在。

为此,根据图 2(a)的腔结构建立仿真模型研究腔损耗与腔失调关系。在仿真模型中,入射光波长 λ = 1064 nm,腔镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>的反射率 R<sub>1</sub> = R<sub>2</sub> = 99.8%,腔镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>的曲率半径 r<sub>1</sub> = r<sub>2</sub> = 1 m,腔长 L = 0.5 m,腔镜 M<sub>2</sub>水平和垂直方向的倾斜失调角度分别记为 α 和 β, α, β ∈ [-0.01°, 0.01°],腔镜 M<sub>1</sub>为固定的倾斜失调 θ<sub>x</sub> 和 θ<sub>y</sub>。假定某时刻到达腔镜 M<sub>2</sub>的光场分布为 E<sub>n-1</sub>,则经过一次腔内往返传输后,根据角谱传播理论<sup>[16]</sup>可计算得到下一次到达腔镜 M<sub>2</sub>的光场分布 E<sub>n</sub>。计算过程表示为

$$E'_n(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [E_{n-1}(x, y) T_2(x, y)] H(f_x, f_y) \right\} \cdot \sqrt{R_2}, \quad (6)$$

$$E_n(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [E'_n(x, y) T_1(x, y)] H(f_x, f_y) \right\} \cdot \sqrt{R_1}, \quad (7)$$

式中: E'<sub>n</sub>表示到达腔镜 M<sub>1</sub>的光场分布; F表示傅里叶变换; F<sup>-1</sup>表示傅里叶逆变换; H表示角谱传递函数; f<sub>x</sub>、f<sub>y</sub>为频域坐标; T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>分别表示镜面 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>的光学调制函数。角谱传递函数和镜面调制函数定义为

$$H(f_x, f_y) = \exp [ikL \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}], \quad (8)$$

$$T_1(x, y) = \exp [-ik(\tan \theta_x \cdot x + \tan \theta_y \cdot y)] \exp \left( -ik \frac{x^2 + y^2}{2r_1} \right), \quad (9)$$

$$T_2(x, y) = \exp [-ik(\tan \alpha \cdot x + \tan \beta \cdot y)] \exp \left( -ik \frac{x^2 + y^2}{2r_1} \right), \quad (10)$$

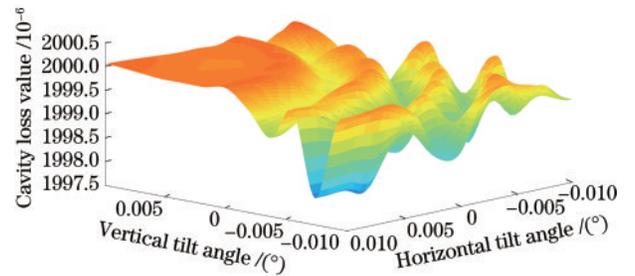
式中: k = 2π/λ表示波数。此时探测器接收到的光场分布 E<sub>nout</sub>可近似描述为

$$E_{nout}(x, y) \propto E_n(x, y). \quad (11)$$

考虑到探测器靶面的有限接收范围,则其接收到的衰荡腔输出光强 I<sub>n</sub><sup>[17]</sup>为

$$I_n = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} E_{nout}(x, y) \cdot E_{nout}^*(x, y) dx dy, \quad (12)$$

式中: W 和 H 分别为探测器靶面宽和高; E<sub>nout</sub><sup>\*</sup>为 E<sub>nout</sub>的共轭光场。将探测器采集到的 n 个输出光强 I<sub>1</sub>, …, I<sub>n</sub>拟合得到腔损耗,然后以步长 0.002°依次扫描 α 和 β 即可得到光腔衰荡系统腔损耗和腔镜 M<sub>2</sub>倾斜失调角度关系,结果如图 3 所示。

图 3 腔损耗和腔镜 M<sub>2</sub>倾斜失调角度映射关系图Fig. 3 Relationship between cavity loss value and tilt misalignment angle of cavity mirror M<sub>2</sub>

从图 3 可以看出,腔损耗在腔镜反射率为 99.8% 时随腔镜二维失调呈现出多极值、非线性的分布特性。鉴于此,在实际调控过程中,为避免陷入局部最优,最大程度保证无相对失调,提升测量精度的准确性和稳定性,本文提出一种基于腔调节参数扫描的腔损耗寻优调控方法,通过寻找基横模状态下初始腔和测试腔优化的腔损耗来计算待测样片反射率。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验装置

根据上述原理搭建实验系统,初始腔和测试腔分别采用三腔镜和四腔镜结构,如图 4 和图 5 所示。激光光源采用中心波长为 1064 nm 的连续波半导体激光器 (RGB Photonics),由方波发生器以 100 Hz 方波进行调制后,经分光镜 M<sub>4</sub>与 532 nm 指示光同轴输出。光束经可变衰减片注入衰荡腔内,方波下沿产生衰荡信号。衰荡腔中 M<sub>1</sub>和 M<sub>3</sub>为平面腔镜, M<sub>2</sub>为曲率半径约为 1 m 的平凹腔镜。腔镜 M<sub>1</sub>和 M<sub>2</sub>均安装在二维可调反射镜座 (VM1, 调节分辨率为 0.005°, Thorlabs, 美国)内。待测样片为西格玛光机产品 (Model: 88-533, Opto Sigma, 日本), 1064 nm 波段的标称反射率在

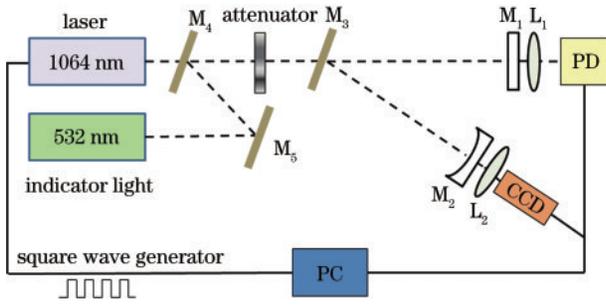


图 4 初始腔实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of initial cavity experimental device

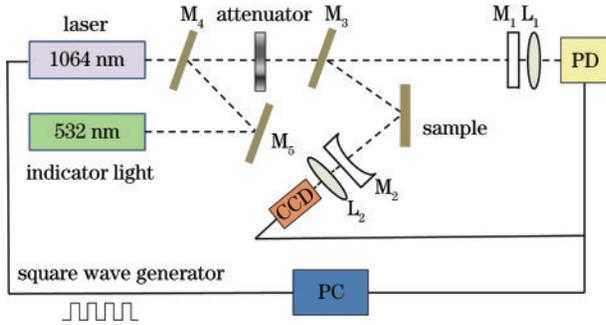


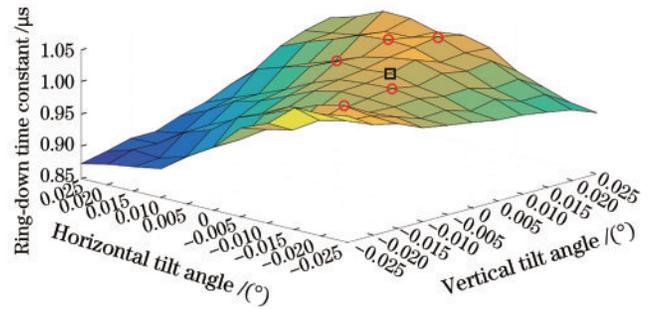
图 5 测试腔实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of measured cavity experimental device

99.9% 以上,本样片经分光光度计测得反射率大于 99.9%,分光光度计测量反射率的理论精度为  $\pm 0.1\%$ 。 $L_1$  和  $L_2$  均为聚焦透镜。初始腔和测试腔腔长均约为 0.650 m,满足稳定腔条件。光电探测器 (APD130C/M, Thorlabs, 美国) 用于监测衰荡光强信号,相机 (HXG20, Baumer, 瑞士) 用于监测腔内模式 (光强分布),衰荡信号由数据采集卡 (M2i. 3010, 80 MHz, Spectrum, 德国) 采集传输到计算机上,经 WLS-DS 算法<sup>[18-19]</sup>分析处理后得到衰荡时间。

### 3.2 腔镜扫描的实验结果及分析

在腔镜倾斜扫描实验中,由于初始腔到测试腔结构转换中,衰荡腔内只有  $M_2$  发生了位置变动,故仅对  $M_2$  进行二维扫描。在基横模状态下,以步长  $0.005^\circ$  调节腔镜  $M_2$  水平和垂直两个维度的倾斜角度,记录相应衰荡时间,两个维度倾斜量范围为  $\pm 0.025^\circ$ ,采集数据  $11 \times 11$  组。结果如图 6 所示,为方便比较,图中红色圆圈标记点为局部极值点,黑色方框标记点为透射光强

图 6 测试腔腔镜  $M_2$  不同倾斜角度下的衰荡时间分布图Fig. 6 Ring-down time distribution of measured cavity mirror  $M_2$  at different tilt angles

信号达到峰值时的衰荡时间,此点即为传统方法<sup>[10-11]</sup>认定的调腔标准点。传统判据是在衰荡信号峰值附近寻找衰荡时间最长的位置。从图 6 可以看出,光腔输出信号达到峰值时,衰荡时间并非最长,即此刻的腔损耗并非最小。此外,衰荡时间分布图中存在多个高于信号峰值点的局部最优腔状态,意味着可能存在多个腔损耗极值,进一步表明了腔损耗的变化呈现出非线性、多极值的分布特性。通过腔失调参数与腔损耗的映射关系可以发现,在衰荡信号峰值点附近存在多个局部极值点。若在初始腔和测试腔的两次测量过程中,取到不同的局部极值,则会产生相对失调误差,进而影响测量结果的可靠度与准确性。理论上,初始腔和测试腔在基横模状态下腔损耗最小的位置应更接近腔无失调位置。

为验证本文方法测量结果的准确度和稳定性,在基横模状态下,利用信号峰值标准和腔镜二维扫描得到的衰荡时间标准对同一待测样片进行 6 次重复性测量实验。实验过程中,在实验台上标记各腔镜的安装位置,以尽可能确保 6 次测量实验是在同一位置和同样入射角下进行。由于每次测量实验均调节了全部腔镜,因此各次实验的光腔衰荡时间均发生了一定的波动。但每一次实验均在找到光腔衰荡信号峰值位置后,再以该位置为基准在保证信号幅值较大的基础上进行  $\pm 0.025^\circ$  的扫描测量实验记录。实验中每个扫描位置均记录 100 次腔损耗观测值并统计,统计均值为反射率测量值,统计均方根值为测量精度。实验结果如表 2 和图 7 所示。

表 2 两种标准下的高反射率测量重复性实验结果

Table 2 Experimental results of high reflectivity repeatability measurement under two standards

Number of experiments	Signal peak standard			Ring-down time standard		
	Initial cavity ring-down time / $\mu\text{s}$	Measured cavity ring-down time / $\mu\text{s}$	Reflectance of sample $R_r / \%$	Initial cavity ring-down time / $\mu\text{s}$	Measured cavity ring-down time / $\mu\text{s}$	Reflectance of sample $R_r / \%$
1	1.760 $\pm$ 0.008	0.967 $\pm$ 0.005	99.8991	1.843 $\pm$ 0.009	1.063 $\pm$ 0.005	99.9138
2	1.835 $\pm$ 0.014	0.958 $\pm$ 0.006	99.8920	1.842 $\pm$ 0.013	1.059 $\pm$ 0.008	99.9131
3	1.603 $\pm$ 0.012	1.009 $\pm$ 0.008	99.9219	1.765 $\pm$ 0.011	1.039 $\pm$ 0.008	99.9158
4	1.735 $\pm$ 0.012	0.920 $\pm$ 0.004	99.8894	1.818 $\pm$ 0.012	1.058 $\pm$ 0.005	99.9144
5	1.506 $\pm$ 0.019	0.940 $\pm$ 0.006	99.9134	2.074 $\pm$ 0.019	1.145 $\pm$ 0.005	99.9153
6	1.648 $\pm$ 0.010	0.965 $\pm$ 0.003	99.9070	1.907 $\pm$ 0.011	1.089 $\pm$ 0.006	99.9147

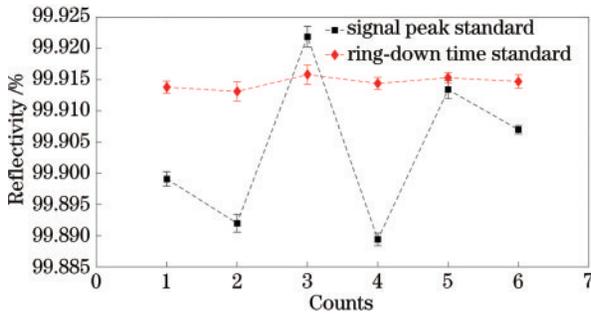


图7 信号峰值标准和衰荡时间标准下重复实验结果比较  
Fig. 7 Comparison of repeated experimental results under signal peak standard and ring-down time standard

由表2可知,信号峰值标准下的反射率测量平均值为99.9038%,测量重复性精度为 $1.26 \times 10^{-4}$ 。而衰荡时间标准下的反射率测量平均值为99.9145%,测量重复性精度约为 $9.83 \times 10^{-6}$ ,相对提升了92.2%,且6次实验结果均和样片标称反射率相符,测量结果更加稳定。由图7可知,信号峰值标准下的重复性测量PV值高达 $3.25 \times 10^{-4}$ 。而衰荡时间标准下测得的样片反射率PV值约为 $2.7 \times 10^{-5}$ ,重复性测量PV值相对提升了91.7%。

接下来,对实验结果进行测量误差分析。本实验系统参数如表3所示。

表3 实验系统参数

Table 3 Experimental system parameters

Experimental system parameter	Parameter value
$R / \%$	$\approx 99.882$
$R_3 / \%$	$\approx 99.914$
$\Delta R / R$	$\approx 9.6042 \times 10^{-6}$
$\Delta L / L$	$\approx 0.0015$
$\Delta \tau_2 / \tau_2$	$\approx 0.0047$

将表3中各参数代入式(5)可得本实验系统反射率测量相对误差理论值约为 $2.24 \times 10^{-5}$ 。理论上,反射率测量 $R_3$ 近似服从如下的正态分布

$$R_3 \sim N(R_0, \sigma), \quad (13)$$

式中: $R_0$ 为待测镜片反射率真值; $\sigma \approx 2.24 \times 10^{-5}$ 。因此,图7中6次测量结果的统计特性可描述为

$$\bar{R}_3 \sim N\left(R_0, \frac{\sigma}{\sqrt{6}}\right). \quad (14)$$

测量重复性精度理论值 $\sigma/\sqrt{6}$ 约为 $9.14 \times 10^{-6}$ ,而实际得到的测量重复性精度约为 $9.83 \times 10^{-6}$ ,与理论值较为接近。从图7可以看出,传统方法相较于本文方法重复测得的反射率值存在较大的波动,分析原因可能是腔损耗存在多极值、非线性的特性,导致调腔局部寻优,并导致初始腔和测试腔相对处于不同极值,产生相对失调,引入相对误差,进而影响到测量结果的可靠性与稳定性。重复性实验测量结果表明,在初始腔反射率较低的情况下,传统调腔方法容易陷入局部

寻优,通过腔失调参数与腔损耗之间映射关系的研究,本文方法在一定程度上避免了局部寻优问题,获得了测量重复性精度更高的测量结果,有助于提升光腔衰荡高反射率测量的稳定性和可靠性。

## 4 结 论

本文通过腔镜二维扫描寻优的方法,以衰荡时间为标准寻找到了基横模状态下初始腔和测试腔相对失调优化的腔状态,得到了重复性精度和准确度均更高的反射率测量结果。对比传统以光腔输出信号峰值为标准的方法可知,该方法对同一高反射率待测样片6次实验测量结果的测量重复性精度由 $1.26 \times 10^{-4}$ 提高到约 $9.83 \times 10^{-6}$ ,降低了测量结果的重复性误差,获取到了更加可靠与稳定的测量结果,为在初始腔反射率较低的光腔衰荡测量系统中测量待测样片反射率的准确度提升提供了一种可能的解决方案。此外,通过基横模状态下的腔损耗全局寻优,充分认识了腔参数失调量与腔损耗之间非线性、多极值的映射关系,为抑制衰荡腔相对失调提供了一种解决方案,也可为实现光腔衰荡高反射率测量仪器化和自动化提供参考。后续可采用更高反射率的衰荡腔腔镜进行更多维度的衰荡腔失调参数扫描研究,以获得更全面的衰荡腔失调影响模型。

## 参 考 文 献

- [1] Sanders V. High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors[J]. Applied Optics, 1977, 16(1): 19-20.
- [2] 李斌成, 龚元. 光腔衰荡高反射率测量技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(2): 021203.  
Li B C, Gong Y. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 021203.
- [3] Anderson D Z, Frisch J C, Masser C S. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time[J]. Applied Optics, 1984, 23(8): 1238-1245.
- [4] Xiao S L, Li B C, Wang J. Precise measurements of super-high reflectance with cavity ring-down technique[J]. Metrologia, 2020, 57(5): 055002.
- [5] Hashiguchi K, Lisak D, Cygan A, et al. Wavelength-meter controlled cavity ring-down spectroscopy: high-sensitivity detection of trace moisture in  $N_2$  at sub-ppb levels[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 241: 152-160.
- [6] Yang L Z, Yang J J, Yang Y, et al. Optical sensors using chaotic correlation fiber loop ring down[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2031-2037.
- [7] Paldus B A, Kachanov A A. An historical overview of cavity-enhanced methods[J]. Canadian Journal of Physics, 2005, 83(10): 975-999.
- [8] 易亨瑜. 衰荡腔失调下的波形仿真[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 399-404.  
Yi H Y. Misalignment simulation of cavity ring-down

- waveform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(3): 399-404.
- [9] 何星. 高反射率精密测量技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016: 74-91.  
He X. Study on precise and accurate measurement technique of high reflectivity[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 74-91.
- [10] 薛颖, 杜星湖, 何星, 等. 基于透射光斑形态监测的光腔衰荡调控方法[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0504001.  
Xue Y, Du X H, He X, et al. Ring-down cavity adjustment method based on transmission spot shape monitoring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0504001.
- [11] 杜星湖, 薛颖, 何星, 等. 基于耦合光腔衰荡技术的高反射率测量[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604006.  
Du X H, Xue Y, He X, et al. High reflectivity measurement based on coupled cavity ring-down technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604006.
- [12] O'Keefe A, Deacon D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources[J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(12): 2544-2551.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 激光器和激光相关设备: 光腔衰荡高反射率测量方法: GB/T 37412—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Lasers and laser-related equipment: cavity ring-down method for high reflectance measurement: GB/T 37412—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [14] Cui H, Li B C, Han Y L, et al. Extinction measurement with open-path cavity ring-down technique of variable cavity length[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13343-13350.
- [15] Telfah H, Paul A C, Liu J J. Aligning an optical cavity: with reference to cavity ring-down spectroscopy[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9464-9468.
- [16] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 82-86.  
Lü N G. Fourier optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 82-86.
- [17] 曲哲超, 李斌成, 韩艳玲. 光学元件失调对光腔衰荡高反射率测量影响的理论分析[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1366-1371.  
Qu Z C, Li B C, Han Y L. Influence of test mirror's misalignment on high reflectivity measurement with cavity ring-down technique[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1366-1371.
- [18] He X, Yan H, Dong L Z, et al. Data point selection for weighted least square fitting of cavity decay time constant [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(1): 014211.
- [19] He X, Luan Y S, Dong L Z, et al. Signal smoothing for accurate extraction of low signal-to-noise ratio cavity ring-down signal[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(11): 46-53.