

# 基于透射光斑形态监测的光腔衰荡调控方法

薛颖<sup>1,2,3</sup>, 杜星湖<sup>1,2,3</sup>, 何星<sup>1,2\*</sup>, 王帅<sup>1,2</sup>, 杨平<sup>1,2</sup>, 许冰<sup>1,2\*\*</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** 为克服光腔衰荡高反射率测量过程中初始腔和测试腔结构转换导致的腔参数相对失调, 提升调控效率, 提出一种基于衰荡腔透射光斑形态监测的调控方法。以衰荡腔透射光斑外接矩形宽高比及光斑与其外接矩形面积的比率作为调控依据, 抑制腔参数失调导致的高阶横模激发, 使初始腔和测试腔透射光斑均保持在基横模状态。实验结果显示: 以宽高比和面积比作为调控依据, 不仅能够分辨不同的光斑模式, 同时能有效应对模式间的特殊光斑形态(如椭圆光斑、多模跳变等)。当初始腔和测试腔光斑均调节至基横模状态时, 测得的样片反射率均值最高且方均根最小。结果表明该方法有助于提高光腔衰荡高反射率测量技术的调控效率。

**关键词** 测量; 光腔衰荡; 高反射率测量; 光斑模式; 调控方法

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0504001

## Ring-Down Cavity Adjustment Method Based on Transmission Spot Shape Monitoring

Xue Ying<sup>1,2,3</sup>, Du Xinghu<sup>1,2,3</sup>, He Xing<sup>1,2\*</sup>, Wang Shuai<sup>1,2</sup>, Yang Ping<sup>1,2</sup>, Xu Bing<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** This paper proposes a cavity adjustment method that corrects the relative misalignment of cavity parameters caused by the conversion of the initial cavity and test cavity structure during cavity ring-down high reflectance measurements. The proposed method monitors the shape of the ring-down cavity-transmission spot and also improves the efficiency of cavity adjustment. The cavity adjustment is based on the aspect ratio of the circumscribed rectangle and the area ratio of the spot to the circumscribed rectangle. The method suppresses the excitation of the high-order transverse mode caused by the misalignment of cavity parameters and maintains the transmission spot modes of the initial and test cavities in the TEM<sub>00</sub> mode. In experimental tests, the adjustment based on the aspect ratio and area ratio not only distinguished different spot modes but also effectively dealt with special spot patterns between modes (such as elliptical spot and multimode jump). When the initial cavity and the test cavity spots were adjusted to the TEM<sub>00</sub> mode, the measured mean reflectance of the sample was maximized and root mean square was minimized. Results show that this method can help to improve the cavity adjustment efficiency in cavity ring-down high-reflectance measurement technology.

**Key words** measurement; cavity ring-down; high reflectance measurement; spot mode; cavity adjustment method

**OCIS codes** 120.4820; 140.3410; 230.5160

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2019-12-11; 录用日期: 2019-12-19

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)

\* E-mail: hexingjiayou@126.com; \*\* E-mail: bing\_xu\_ioe@163.com

# 1 引 言

光腔衰荡高反射率测量技术<sup>[1]</sup>是一种基于高精度谐振腔的精密探测技术,被认为是目前唯一能精确测量高反射率( $R > 99.9\%$ )的方法<sup>[2]</sup>,其测量不确定度可达  $0.0001\%$  (1 ppm) 或更低<sup>[3-4]</sup>。该技术的具体测量过程如下:搭建初始衰荡腔并测量腔损耗,加入待测样片构成测试衰荡腔后再次测量腔损耗,根据腔损耗的变化量计算待测样片反射率数值。理论上,腔损耗变化量只由待测样片导致,然而在初始腔和测试腔结构转换过程中腔参数相对失调也会影响腔损耗变化量,从而引入测量误差。若测试腔的腔参数失调量相对初始腔更小,则测量结果将偏高,极端情况甚至可能出现反射率大于 1 的观测结果;反之,测量结果将会偏低。因此,克服腔参数相对失调是保证该技术测量稳定性和可靠性的关键因素之一。

近年来,针对光腔衰荡高反射率测量应用中的调控问题,学者们进行了一系列的研究,提出几种调控判据和方法。文献[5]提到用衰荡腔透射峰值作为调控依据,文献[6]提到通过观测衰荡腔透射脉冲能量包络来调节腔镜。这两种方法都比较依赖操作人员的经验,容易受到操作人员主观因素的影响。韩艳玲等<sup>[7]</sup>提出通过计算激光在衰荡腔内往返一次后两透射波的相位延迟来定量评价衰荡腔调节情况,但由于计算相位延迟的系数是通过拟合待测样片反射率与衰荡腔输出信号幅值倒数之间的关系得到的,因此所提方法仅适用于测试腔调节,无法应对初始腔调节过程。以上三种方法均不能定量评价整个调控过程。中国科学院光电技术研究所的何星<sup>[8]</sup>于 2016 年提出一种用于光腔衰荡高反射率测量的双传感器调控方法,在观测衰荡腔透射峰峰值的基础上,通过引入相机来监控透射光斑形态,辅助衰荡腔调准。他提出采用模板匹配来判断光斑形态,但是可能无法识别 TEM<sub>01</sub> 和 TEM<sub>10</sub> 模这两种光斑,导致无法判断调节方向,且该方法在自动化调控实现过程中存在运算量大、算法复杂的问题,制约了该技术向仪器化和自动化方向的发展。

基于此,本文提出了一种简单有效的判别光斑模式的方法,即用光斑外接矩形宽高比(下文简称宽高比),以及光斑与其外接矩形面积的比率(下文简称面积比)来分辨不同的光斑形态。本文方法具有原理简单、运算量小、定量分析、不依赖人工经验的优点,是一种适于仪器化和自动化的调控方法。实

验结果表明,该方法有助于提升光腔衰荡高反射率测量技术的调控效率,使其具有更好的调控效果。

## 2 基本原理

### 2.1 光腔衰荡高反射率测量基本原理

光腔衰荡系统(以直型腔结构为例)如图 1 所示,由两个平凹镜构成无源谐振腔(衰荡腔)。在  $t = 0$  时刻向腔内注入一束脉冲光,若光源波长与衰荡腔满足纵模匹配条件,则会在衰荡腔内发生谐振,衰荡腔透射光强遵循指数衰减<sup>[9]</sup>,可表示为

$$I(t) = I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad t > 0, \quad (1)$$

式中: $I$  表示透射光强; $I_0$  表示  $t = 0$  时刻的衰荡腔透射光强; $\tau = nL/[c(\alpha L - \ln R)]$  为透射光强从  $I_0$  衰减到  $I_0$  的  $1/e$  所需的时间, $c$  为光速, $L$  为腔长, $\alpha$  为腔内介质的吸收系数, $n$  为腔内介质折射率。设腔内介质为空气,则折射率  $n$  近似为 1。腔内无吸收介质时  $\alpha$  可忽略不计,则可得腔镜的平均反射率为

$$\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2} = 1 - \frac{L}{c\tau}, \quad (2)$$

式中: $R_1$ 、 $R_2$  分别为腔镜 M1、M2 的反射率。

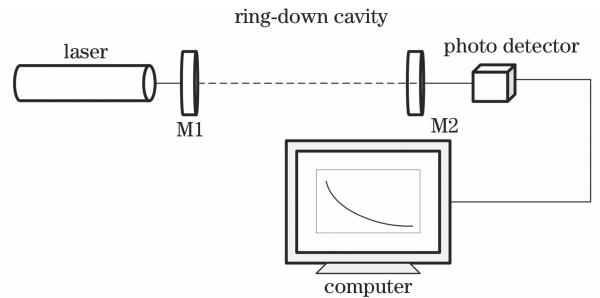


图 1 直型腔结构光腔衰荡系统

Fig. 1 Straight cavity structure optical cavity ring-down system

在图 1 所示的直腔中插入待测样片 M3,构成折叠腔,分别测量直腔和折叠腔的输出信号,并拟合得到相应的衰荡时间  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ,则待测镜的反射率  $R_3$  为

$$R_3 = \exp\left(\frac{L}{c\tau_1} - \frac{L'}{c\tau_2}\right), \quad (3)$$

式中: $L'$  为测试腔腔长,其应尽可能与初始腔腔长  $L$  保持一致。

### 2.2 调控过程分析

由衰荡法反射率测量原理可知,光腔衰荡高反射率测量依赖于初始腔和测试腔的腔损耗对比,(3)式成立的条件是初始腔和测试腔除待测样片引起的损耗之外,其他损耗需保持一致。然而,在测量过程

中,由于初始腔和测试腔之间存在结构的转换,腔参数(腔镜角度、腔轴位置等)的相对失调不可避免。实验发现,初始腔或测试腔的腔参数失调会在谐振腔内激发高阶横模甚至多横模,如图2所示。基横模与高阶横模同时激发会导致衰荡曲线偏离理想的单指数衰减形式,更符合双指数模拍模型<sup>[10]</sup>,在高

阶横模运行状态下测量衰减时间常数,需采用针对性的数据处理方法<sup>[11]</sup>,而且初始腔和测试腔的失调量不一致会导致测量误差,极不利于光腔衰荡技术的精密测量。通过以上分析,在光腔衰荡高反射率测量技术中,控制谐振腔内运行模式为基横模状态对于该技术的稳定性和可靠性至关重要。

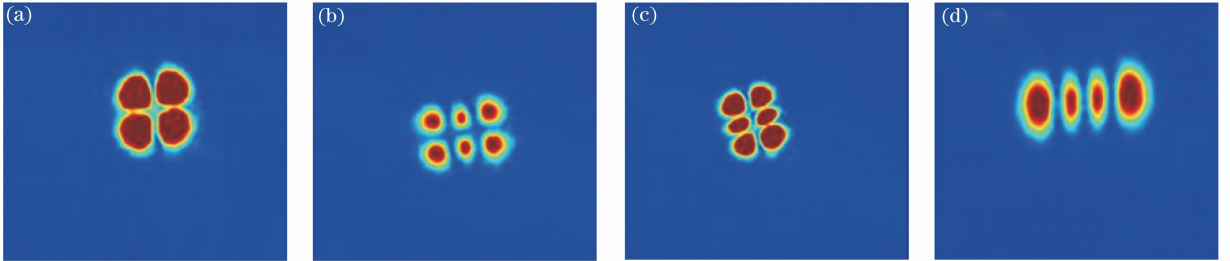


图2 腔失调产生的4种高阶横模。(a) TEM11;(b) TEM21;(c) TEM12;(d) TEM03

Fig. 2 Four high-order transverse modes generated by cavity imbalance.

(a) TEM11; (b) TEM21; (c) TEM12; (d) TEM03

通过实验观测发现,将衰荡腔透射光斑调节至基横模状态后,在水平方向调偏腔镜时只会在水平方向激发高阶横模,在竖直方向调偏腔镜会在竖直方向激发高阶横模,如图3所示。为降低算法运行成本,便于实现自动化调控,本文提出了一种简单快速的判别方法,即用光斑外接矩形宽高比及光斑与其外接矩形面积的比率来分辨不同的光斑形态。

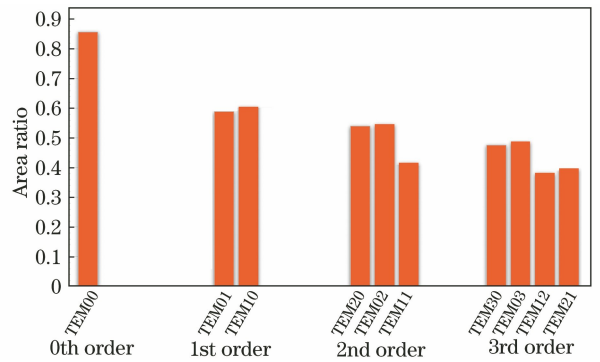


图4 不同模式光斑的面积比

Fig. 4 Area ratio of different spot modes

再进行判断,直到将光斑形态调节至基横模状态。

### 3 实验装置

根据光腔衰荡高反射率测量原理搭建实验系统,其中初始腔采用三镜谐振腔结构<sup>[12]</sup>,如图6所示,激光光源采用连续波 F-P(Fabry-Perot)型半导体激光器(Model IQ1A07, Power Technologies),光束经可变衰减片注入衰荡腔中,注入光束与衰荡腔光轴同轴。光源输出电压由方波发生器调制,在方波下降沿激光器快速关断,衰荡腔内产生衰荡信号。腔镜 M1 的透射光束由 InGaAs 光电探测器(PDA400,Thorlabs)接收,腔镜 M2 的透射光束由相机(TGX03,Baumer)接收。光电探测器和相机采集的信号再由数据采集卡(M2i.3010,Spectrum,80 MSa/s,12 bit)采集输入到计算机进行分析。其中腔镜M1、M2为凹面反射镜,凹面曲率半径均为1 m,M3为平面反射镜。腔长L为0.765 m,满足稳

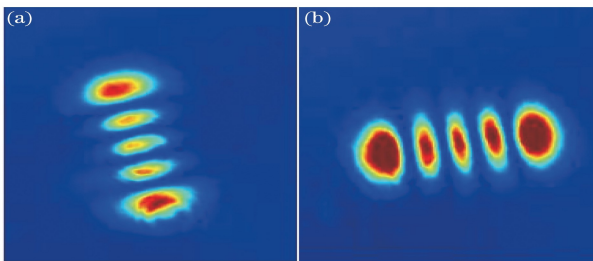


图3 调偏腔镜时的光斑形态。(a)只在竖直方向

调偏腔镜;(b)只在水平方向调偏腔镜

Fig. 3 Spot modes when adjusting cavity mirror. (a) Adjust cavity mirror in the vertical direction only; (b) adjust cavity mirror in the horizontal direction only

### 2.3 调控流程

基于衰荡腔透射光斑形态监测的调控方法要通过以下步骤实现。计算仿真得到基横模光斑的面积比 $R_A$ 为0.8147,宽高比 $R_L$ 为1,不同模式光斑的面积比如图4所示。根据计算结果及大量实验,最终设定判断光斑模式为基横模的准则为:宽高比在0.9~1.1范围内,面积比大于0.8。调控流程如图5所示。当纵横模的阶次不同时,宽高比可以作为调节腔参数的依据。当纵横模阶次相同或光斑轴线旋转45°时,宽高比为1,此时可以任意调节一个方向,

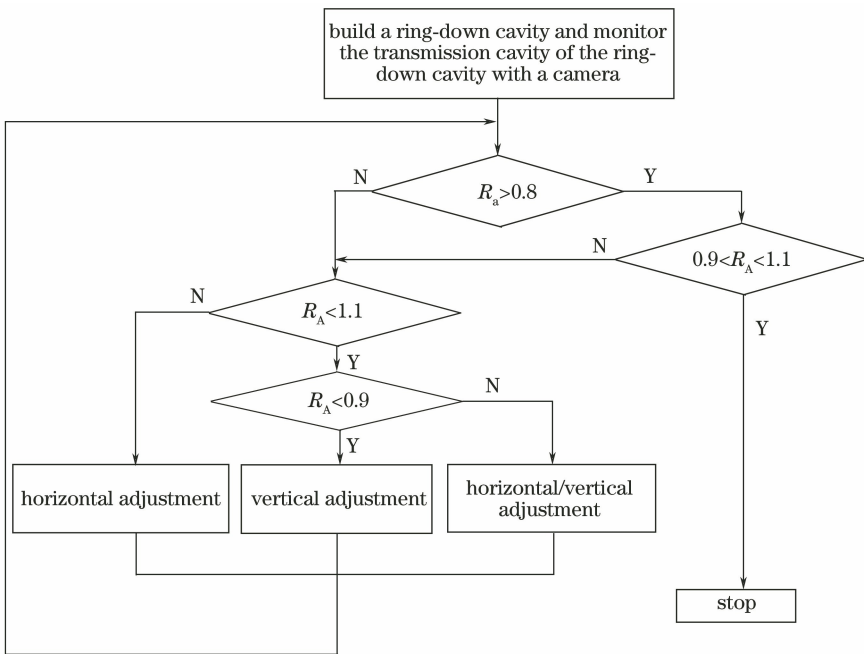


图 5 调腔过程流程图

Fig. 5 Flow chart of cavity adjustment process

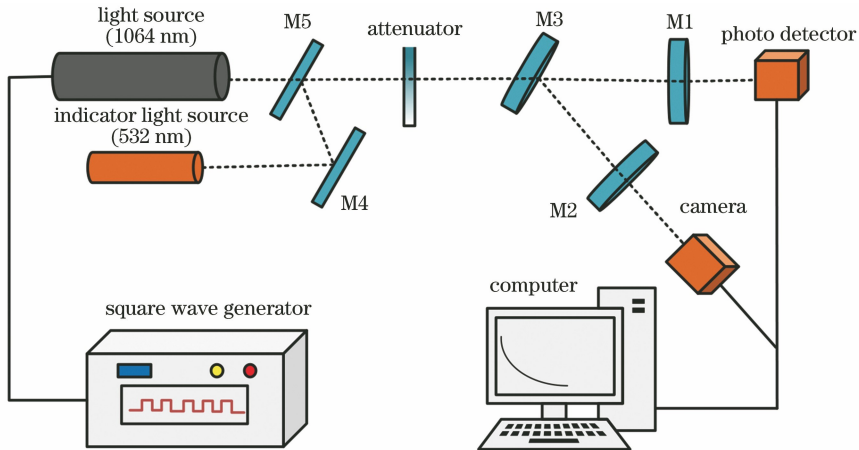


图 6 初始腔的实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of the initial cavity experimental device

定腔条件。引入辅助调节的可见指示光源(532 nm 绿光),指示光源经 M4、M5 调节实现与激光光源同轴。测量样片反射率时,在腔内插入待测样片构成 4 腔镜结构<sup>[13]</sup>,如图 7 所示,测试腔腔长  $L' \approx L = 0.765 \text{ m}$ 。

#### 4 分析与讨论

计算各种形态光斑的宽高比和面积比,并对初始腔和测试腔不同光斑形态下的腔镜平均反射率进行了测量。初始腔数据如表 1 所示,对提取的 512 个衰荡信号进行均值计算,可得出每一组的反射率和衰减时间常数,  $R_0$  表示初始腔平均反射率,  $\tau_0$  表

示初始腔的衰减时间常数,表 1 中的误差范围为  $R_0$  和  $\tau_0$  的方均根值,表示其重复性误差。

从表 1 中可以看出,总体而言,腔内光斑模式处于高阶模状态测得的衰减时间常数小于低阶模的,某些高阶模测得结果高于低阶模,但是其衰荡拟合曲线残差很大,说明其衰减规律很可能已偏离单指数衰减函数。实验中发现,当衰荡腔产生谐振以后,调偏测试腔腔镜最多激发 1 阶模,无法像初始腔那样产生更高阶的模式,但是仍会产生介于 TEM00 模和 TEM10 模之间的椭圆形光斑,表 2 给出了这些特殊形态光斑的测量结果,  $R'$  表示测试腔平均反射率,  $\tau'$  表示测试腔衰减时间常数。

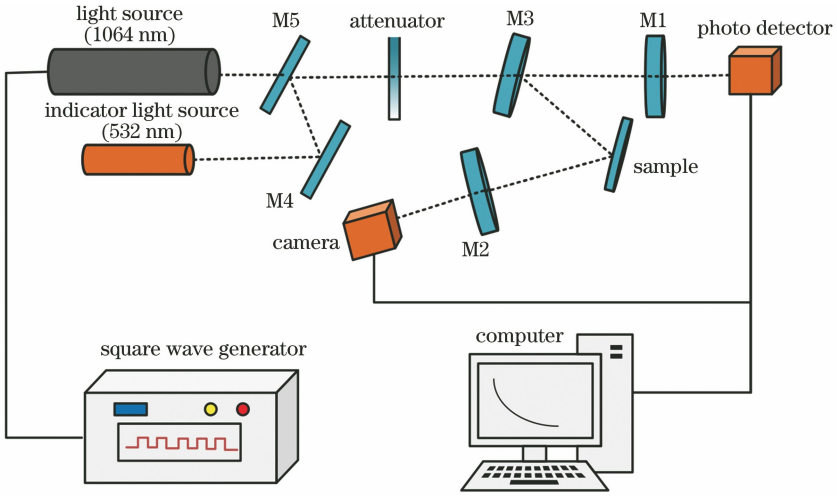


图 7 测试腔实验装置示意图

Fig. 7 Schematic of the test cavity experimental device

表 1 不同模式下的初始腔性能参数

Table 1 Initial cavity performance parameters in different modes

Spot mode	Average reflectance $R_0$ /%	Decay time constant $\tau_0$ / $\mu$ s	Aspect ratio	Area ratio
	99.877±0.003	2.068±0.047	1.0149	0.8231
	99.879±0.002	2.104±0.042	1.3077	0.6670
	99.871±0.003	1.982±0.053	1.7193	0.6173
	99.830±0.006	1.499±0.056	2.2000	0.5478
	99.862±0.004	1.851±0.055	2.1525	0.4466
	99.850±0.005	1.698±0.063	0.7000	0.7060
	99.846±0.004	1.655±0.041	0.5376	0.5151
	99.874±0.004	2.029±0.060	0.5229	0.4473
	99.857±0.009	1.792±0.116	0.5738	0.3526
	99.878±0.002	2.095±0.039	1.0533	0.4827
	99.855±0.005	1.763±0.067	1.2338	0.4577
	99.866±0.002	1.905±0.026	0.8065	0.4787
	99.864±0.004	1.880±0.054	1.0202	0.4138






以基横模状态下衰荡腔腔镜的平均反射率作为初始腔反射率,计算得表 2 中几种特殊光斑形态下待测样片的反射率  $R$  为

$$R = \frac{R'}{R_0}, \quad (4)$$

其方均根  $\sigma$  为

表 2 测试腔在不同模式下的性能参数

Table 2 Performance parameters of test cavity in different modes

Spot mode	Average reflectance $R'$ /%	Decay time constant $\tau'$ / $\mu$ s	Aspect ratio	Area ratio
	99.807±0.014	1.329±0.095	1.1429	0.7515
	99.627±0.030	0.687±0.060	1.3103	0.7595
	99.679±0.009	0.795±0.021	1.4444	0.6612
	99.830±0.005	1.502±0.039	1.1795	0.7960
	99.834±0.006	1.532±0.050	1.0714	0.8452

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial R_0} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial R'} \sigma_2\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{R'}{R_0^2} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{1}{R_0} \sigma_2\right)^2}, \quad (5)$$

式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分别为初始腔和测试腔平均反射率的方均根。计算得到样片反射率曲线如图 8 所示。

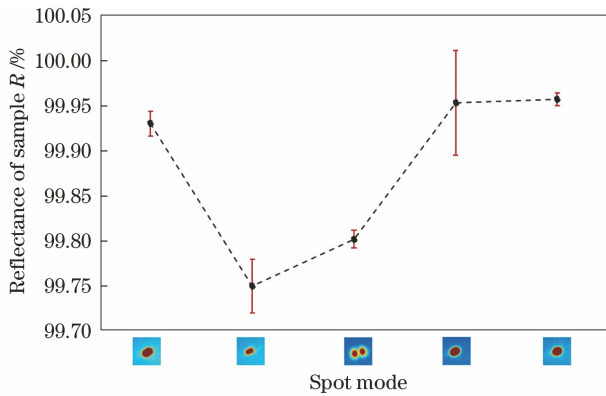


图 8 与表 2 中几种特殊光斑形态对应的样片反射率

Fig. 8 Reflectance of sample corresponding to several special spot modes in Table 2

当初始腔和测试腔光斑均调节至基横模状态时,样片反射率观测结果的均值最高且方均根最小,表明这一状态下测量重复性误差最小。

## 5 结 论

在光腔衰荡技术中,控制谐振腔内运行模式保持基横模状态,对于保证高反射率的精确测量至关重要。同时,计算实际光斑的宽高比和面积比,结果表明用光斑外接矩形宽高比及光斑与其外接矩形面积的比率来等效衰荡腔透射光斑的模式,不仅能够分辨不同的光斑模式,同时能有效应对模式的特殊光斑形态(如椭圆光斑、多模跳变等)。与其他调腔

方法相比,该方法不受人为主观因素影响,降低了测量结果的重复性误差,同时具有简单高效的优点。

## 参 考 文 献

- [1] Herbelin J M, McKay J A, Kwok M A, et al. Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method[J]. Applied Optics, 1980, 19(1): 144-147.
- [2] Li B C, Gong Y. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 021203.  
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.
- [3] Rempe G, Lalezari R, Thompson R J, et al. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. Optics Letters, 1992, 17(5): 363-365.
- [4] Uehara N, Ueda A, Ueda K, et al. Ultralow-loss mirror of the parts-in- $10^6$  level at 1064 nm [J]. Optics Letters, 1995, 20(6): 530-532.
- [5] 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.
- [6] Yi H Y. Misalignment simulation of cavity ring-down waveform [J]. Chinese Journal of 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.
- [7] Han Y L, Li B C, Cui H, et al. Data processing method for measuring cavity ring-down high reflectivity: 104792501A [P]. 2015-07-22.  
韩艳玲, 李斌成, 崔浩, 等. 一种光腔衰荡高反射率测量的数据处理方法: 104792501A [P]. 2015-07-22.
- [8] 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.
- 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.
- [9] 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.
- [10] Wang J D, Yu J, Mo Z Q, et al. Numerical methods of mode selection in continuous-wave cavity ring-down spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 244201.  
王金舵, 余锦, 貂泽强, 等. 连续波腔衰荡光谱技术中模式筛选的数值方法 [J]. 物理学报, 2019, 68(24): 244201.
- [11] Huang H F, Lehmann K K. Noise in cavity ring-down spectroscopy caused by transverse mode coupling [J]. Optics Express, 2007, 15(14): 8745-8759.
- [12] Cui H, Li B C, Xiao S L, et al. Simultaneous measurement of S- and P-polarization reflectivity using optical feedback cavity ringdown technique [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018, 47(2): 307-310.  
崔浩, 李斌成, 肖石磊, 等. 光反馈光腔衰荡技术同时测量高反膜 S 和 P 偏振反射率 [J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(2): 307-310.
- [13] Dong H W, Guo R M, Cui W C, et al. Study on cavity ring-down spectroscopy based on folded cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0311001.  
董贺伟, 郭瑞民, 崔文超, 等. 基于折叠腔的光腔衰荡光谱技术研究 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0311001.