

文章编号:1004-4213(2011)09-1366-6

# 光学元件失调对光腔衰荡高反射率测量影响的理论分析

曲哲超<sup>1,2</sup>, 李斌成<sup>1</sup>, 韩艳玲<sup>1</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**在利用光反馈光腔衰荡技术测量大口径光学元件反射率及其均匀性分布时,需要对光学元件进行二维扫描测量,而在扫描过程中光学元件的倾斜失调将对测量结果造成影响.本文根据失调谐振腔光束传输增广矩阵,通过数值运算模拟了对称共焦腔和一般稳定腔情况下,光反馈衰荡腔结构中由样品倾斜失调引起的输出腔镜上光斑中心位置变化以及对反射率测量的影响.仿真结果表明:对称共焦腔情况下,输出腔镜上奇数次光斑无漂移,偶数次光斑漂移量为固定值;在一般稳定腔情况下,输出腔镜上奇偶数次光斑均往复振荡漂移.分析表明,该系统对样品失调角度的敏感程度与样品在腔内的位置以及腔长有关,通过改变样品在腔内位置,选择适当腔长以及包络拟合法可以减小样品失调对测量结果的影响.

**关键词:**光腔衰荡; 失调; 高反射率; 光学谐振腔

**中图分类号:** O439

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114009.1366

## 0 引言

大口径反射光学元件反射率的高低及均匀性不仅直接影响大型激光系统的效率和输出功率<sup>[1]</sup>,而且对光束质量起着决定性的作用.目前,超高反射率光学元件反射率测量的唯一方法是光腔衰荡技术(Cavity Ring-Down, CRD)<sup>[2-3]</sup>.由于其测量结果不受激光强度波动的影响,测量准确度非常高,已发展成为一种具有超高灵敏度的光谱测量技术.中国工程物理研究院易亨瑜等人研究了直型腔脉冲光腔衰荡技术(Pulsed CRD, P-CRD)中腔长失调<sup>[4]</sup>、探测器口径大小<sup>[5]</sup>以及腔镜倾斜<sup>[6]</sup>对光腔衰荡技术测量的影响.随着连续光腔衰荡技术(Continuous Wave, CW-CRD)的发展<sup>[7-8]</sup>,2008年本实验室提出了光反馈光腔衰荡技术(Optical Feedback CRD, OF-CRD)用于测量高反射率<sup>[9-12]</sup>,并分析了不同光反馈强度对光腔衰荡信号的影响<sup>[13]</sup>,对比了直型腔和频率选择性腔的反馈光及腔输出信号差异.该技术采用基横模宽谱半导体激光器作光源,降低了成本,并简化了实验装置.

根据光反馈光腔衰荡技术测量大口径高反射率

的需要,本文分析了 Z 型腔结构中样品的扫描过程及样品的失调角度对反射率测量的影响.对于大口径光学元件,镀膜过程中产生的膜厚不均匀等因素将导致薄膜元件各处的反射率出现差异,而光腔衰荡反射率测量中探测光斑尺寸较小,必须对光学元件进行扫描测量,才能测试大口径光学元件的反射率及其均匀性.本文讨论了一般稳定腔和对称共焦腔情况下,基于 Z 型腔结构的 OF-CRD 高反射率测量技术中输出腔镜上光斑中心位置随待测光学元件失调角度的变化关系,以及待测光学元件在腔内不同位置处测量结果对失调角度的敏感程度.

## 1 实验装置

实验装置如图 1, V 型初始腔由一平面高反射镜 HRM 和两个平凹高反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  组成,其中  $M_1$  为输出腔镜.当在初始腔内加入待测光学元件后,构成如图 1 中虚线所示的 Z 型测试腔.光源采用由方波调制的连续半导体激光器(基横模  $TEM_{00}$ ),在调制方波下降沿激光束被迅速关断,同时记录光腔衰荡信号.为了提高测试速度,将待测光学元件置于由计算机控制的二维移动平台,每移动一次后,计

基金项目:国家自然科学基金(NO. 60878038)资助

第一作者:曲哲超(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为光腔衰荡技术. Email: quzhechao@126.com

导 师:李斌成(1966-),男,研究员,主要研究方向为光热技术、半导体材料、光学薄膜和准分子激光器检测技术. Email: bcli@ioe.ac.cn

收稿日期:2011-04-27;修回日期:2011-05-30

计算机将自动记录光腔衰荡信号.

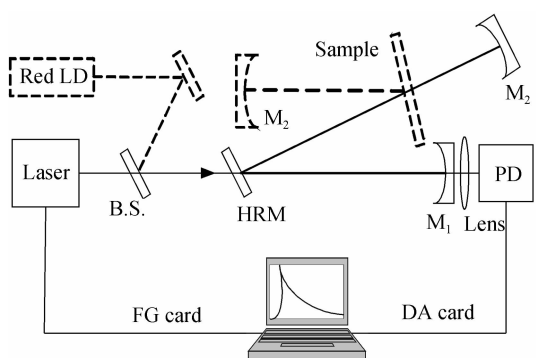


图 1 基于频率选择性光反馈光腔衰荡高反射率测量示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of OF-CRD for high reflectivity measurements

在待测光学元件扫描过程中,由于位移平台机械准确度的限制可能造成测试元件的倾斜角度失调,使测量结果产生误差.目前,高精度二维移动平台的非轴向角度误差很小,因此扫描过程中最大失调角度一般不会超过  $0.5^\circ$ .

## 2 理论模型

如图 2,Z 型测试腔总腔长  $L=L_1+L_2$ ,待测光学元件距输出腔镜  $M_1$  距离为  $L_1$ ,平凹高反射腔镜  $M_1$  和  $M_2$  曲率半径分别为  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ,设待测光学元

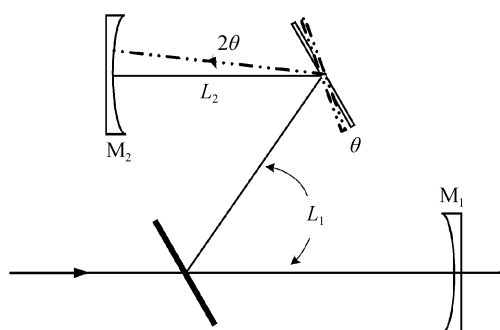


图 2 样品倾斜角度失调示意图  
Fig. 2 Schematic view of the angular misalignment of the sample

件倾斜失调角为  $\theta$ ,因待测光学元件倾斜失调角  $\theta$  而引起输出腔镜  $M_1$  处的失调线位移和角位移分别为  $w$  和  $\delta$ ,取靠近腔镜  $M_1$  为参考面,入射到腔镜  $M_1$  的光线往返一周的失调增广  $ABCD$  矩阵为<sup>[14]</sup>

$$G=B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot D \cdot C \cdot B \cdot A$$

式中:腔镜  $M_1$  和  $M_2$  的无失调增广矩阵分别为

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_2} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ 为待测光学元件失调增广}$$

矩阵, $L_1$  和  $L_2$  自由空间变换增广矩阵分别为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 1 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

由于入射平面镜无失调且其变换矩阵为单位矩阵故省略.

根据  $ABCD$  定律,光线在谐振腔内往返传输  $i$  次后的光线矢量矩阵可表示为

$$\begin{pmatrix} w_i \\ \delta_i \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = G^i \begin{pmatrix} w_0 \\ \delta_0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

式中  $\begin{pmatrix} w_0 \\ \delta_0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  为初始光线矢量矩阵,  $\begin{pmatrix} w_i \\ \delta_i \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  为第  $i$  次往返

后到达输出腔镜  $M_1$  处的光线矢量矩阵.可以看出,在总腔长和腔镜曲率半径一定的情况下,失调线位移  $w_i$  即  $M_1$  腔镜上光斑中心偏离光轴的纵向距离仅与待测光学元件的倾斜失调角度和待测光学元件在腔内位置有关.因此通过失调增广  $ABCD$  矩阵可以得到在不同待测光学元件角度失调的情况下,输出腔镜上光斑中心位置的分布情况.

当入射的连续激光束在调制方波下降沿被快速关断之后,输出腔镜  $M_1$  第  $i$  次输出的相对光振幅平方为

$$|E_i(r)|^2 = |E_0|^2 (R_0^2 R_1 R_2 R_x^2)^{2(i-1)} \cdot \left\{ \frac{1}{a_0} \left( \frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{r}{a_0} \right)^2 \right] \right\}$$

式中  $R_0$  为平面高反射镜的反射率, $R_1$ 、 $R_2$  分别为平凹高反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的反射率, $R_x$  为待测光学元件反射率, $a_0$  为激光束在输出腔镜  $M_1$  上的光斑半径, $E_0$  为输出腔镜  $M_1$  初始输出的相对光振幅, $r$  为输出腔镜  $M_1$  上光斑中心与腔镜中心的纵向距离.

探测器接收第  $i$  次衰荡腔输出光强为

$$I_i = \int_0^{\frac{a}{2}} |E_i(r+w_i)|^2 2\pi r dr$$

式中  $w_i$  为由于待测光学元件的角度失调而引起的第  $i$  次光斑的偏移量, $a$  为有效接收孔径,其大小取

决于输出腔镜口径大小、聚焦透镜的数值孔径和探测器口径. 若采用较高数值孔径的理想聚焦透镜, 有效接收孔径  $a$  近似于输出腔镜口径大小. 这种情况下, 虽然待测光学元件在扫描过程中角度失调引起输出腔镜上光斑中心的偏移, 但是只要光斑不偏移出输出腔镜, 测量结果将不受影响.

### 3 仿真分析

取对称共焦腔总腔长  $L=L_1+L_2=1\text{ m}$ , 平凹高反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的曲率半径  $\rho_1=\rho_2=1\text{ m}$ , 反射率  $R_0=R_1=R_2=R_x=0.9995$ . 图 3 给出了在样品失调角度  $\theta=0.1^\circ$ ,  $L_2=0.5\text{ m}$  时, 输出腔镜  $M_1$  上光斑中心位置偏移量  $w_i$  的变化情况, 可以看出在对称共焦腔中, 腔镜  $M_1$  上奇数次光斑中心位置无偏移, 偶数次光斑中心存在偏移.

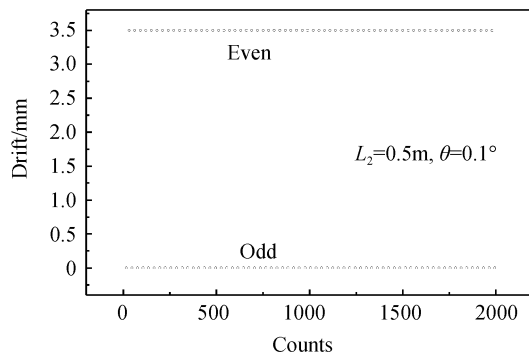


图 3 对称共焦腔情况下, 失调角度为  $0.1^\circ$  时奇偶次光斑偏移量

Fig. 3 The drift of odd and even light spots with angular misalignment of  $0.1^\circ$  in symmetrical confocal resonator

在  $L_2$  固定的情况下, 随着样品失调角度不断增大, 腔镜  $M_1$  上偶数次光斑中心位置偏移量也在逐渐增大, 如图 4, 光斑逐渐向输出腔镜边缘漂移. 在相同样品失调角度情况下, 随着待测光学元件距离腔镜  $M_2$  距离  $L_2$  不断增大, 奇数次光斑中心位置偏

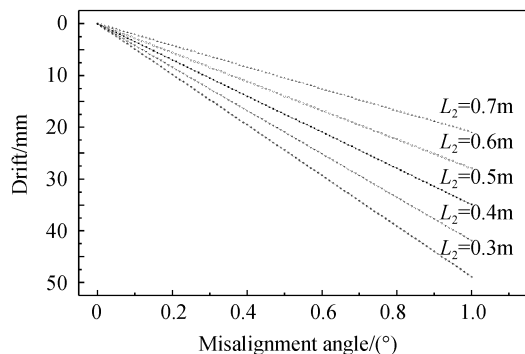


图 4 对称共焦腔情况下, 样品在不同位置处的光斑漂移量随失调角变化

Fig. 4 The relation between the drift of light spot and the angular misalignment at different  $L_2$  in confocal resonator

移量逐渐减小. 因此, 在腔型搭建时可以适当增大样品和腔镜  $M_2$  之间的距离, 以降低样品扫描过程中产生的角度失调对测量结果的影响.

取一般稳定腔总腔长  $L=L_1+L_2=0.9\text{ m}$ , 平凹高反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的曲率半径  $\rho_1=\rho_2=1\text{ m}$ , 反射率  $R_0=R_1=R_2=R_x=0.9995$ . 图 5 给出了在样品失调角度  $\theta=0.1^\circ$ ,  $L_2=0.5\text{ m}$  时, 输出腔镜  $M_1$  上的光斑中心位置偏移量  $w_i$  的变化情况. 从图 5(a) 和(b)中可以看出在一般稳定腔中, 腔镜  $M_1$  上奇偶数次光斑中心位置均振荡漂移, 最大偏移量取决于待测光学元件失调角度的大小. 与对称共焦腔相比, 一般稳定腔中奇偶数次光斑均有偏移, 并且偏移量随往返次数变化称周期性振荡. 在总腔长  $L$  和待测光学元件失调角度一定的情况下, 随着待测光学元件距离腔镜  $M_2$  的距离  $L_2$  不断增大, 奇偶数次光斑中心位置的最大偏移量逐渐减小, 这一特点与对称共焦腔一致.

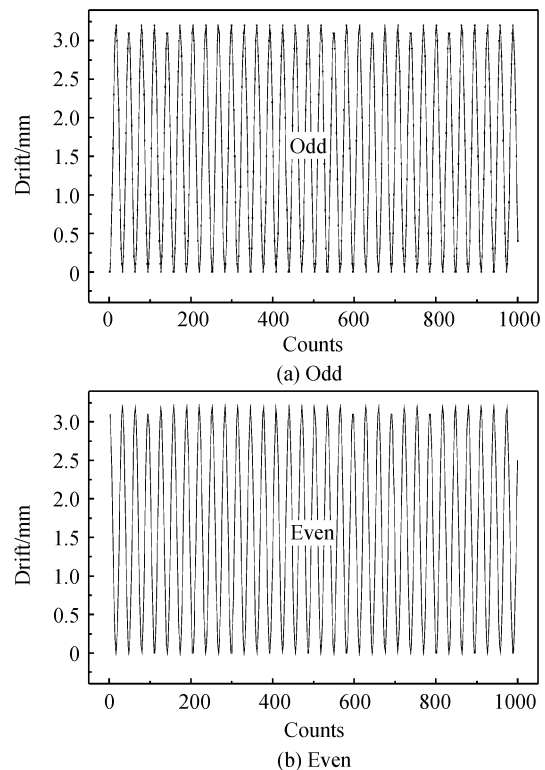


图 5 对一般稳定腔情况下, 失调角度为  $0.1^\circ$  时奇偶次光斑偏移量

Fig. 5 The drift of the odd and even light spots with angular misalignment of  $0.1^\circ$  in stable resonator

为了得到不同总腔长对待测光学元件角度失调的敏感程度, 数值计算出了不同总腔长所对应的输出腔镜  $M_1$  上光斑中心位置的最大偏移量, 如图 6. 图 6 给出了在失调角度  $\theta=0.1^\circ$  时,  $L_2=0.4\text{ m}$  和  $L_2=0.5\text{ m}$  的两条曲线. 在失调角度和  $L_2$  一定的情况下, 曲线的总体趋势是随着总腔长的增加输出腔镜  $M_1$  上光斑中心位置的最大偏移量也增加, 但是

并不是单调增加,其存在一些凹陷.在光腔衰荡技术中,增加总腔长  $L$  有利于提高测量准确度,可是在增加总腔长  $L$  同时又会加大失调角度对测量的影响.

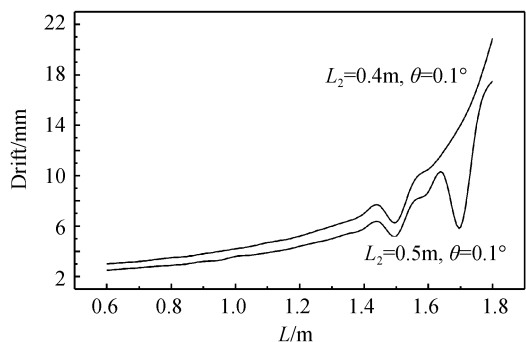
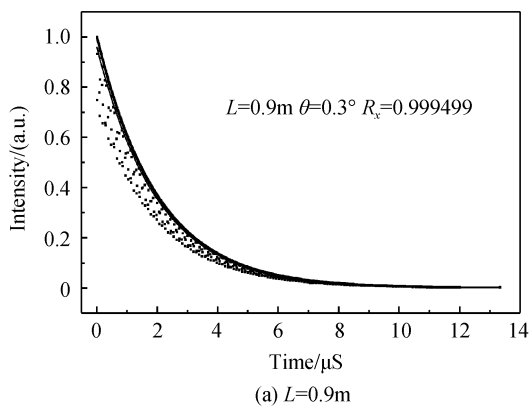
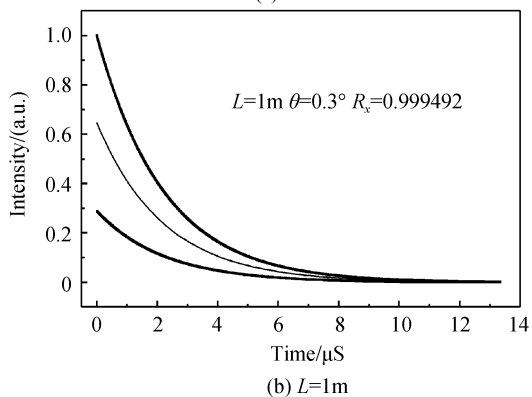


图 6 失调角度为  $0.1^\circ$  时,不同总腔长  $L$  与输出腔镜上光斑最大偏移量关系曲线  
 Fig. 6 The maximum drift of the light spots on the output mirror with different total cavity length  $L$  at the angular misalignment of  $0.1^\circ$

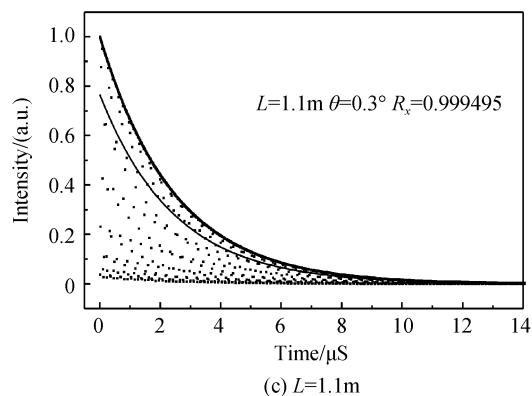
在实验时,一般都会在输出腔镜  $M_1$  后加入一个具有较高数值孔径的聚焦透镜,尽可能多地将腔输出光聚焦到探测器.假定有效接收孔径  $a = 20$  mm,光斑半径  $a_0 = 1$  mm,所有腔镜及待测光学元件反射率  $R = 0.9995$ ,  $L_2 = 0.5$  m.在有效接收孔径一定的情况下,光斑的偏移将导致在有效接收孔径之内不能完全收集光斑能量,产生附加损耗,影响测量结果.通过数值模拟,图 7 给出了在失调角  $\theta = 0.3^\circ$  时,不同腔长时腔镜  $M_1$  输出的光腔衰荡信号及其单指数衰减拟合曲线.



(a)  $L=0.9$ m



(b)  $L=1$ m



(c)  $L=1.1$ m

图 7 在失调角度为  $0.3^\circ$  时,不同腔长情况下光腔输出衰荡信号  
 Fig. 7 The ring-down signals of the cavity outputs vs. different cavity lengths with the angular misalignment of  $0.3^\circ$

随着腔长的增加,输出腔镜  $M_1$  上光斑中心位置的最大偏移量也随之增加.图 7(a)对应腔长最小为  $0.9$  m,最大偏移量为  $9.5$  mm;图 7(b)为对称共焦腔,偶数次光斑偏移量为  $10.5$  mm;图 7(c)对应腔长最大为  $1.1$  m,最大偏移量为  $11.6$  mm.利用最小二乘法,按单指数衰减函数拟合衰荡信号得出待测光学元件反射率,从图 7(b)和(c)可知,虽然(c)所示一般稳定腔腔长和最大光斑偏移量均大于(b)所示对称共焦腔腔长和光斑偏移量,但是其拟合结果却优于对称共焦腔情况.

为了比较不同腔长对待测光学元件失调角度的敏感程度,模拟了在三种腔长情况下,不同样品失调角度时的反射率测量结果,如图 8.待测光学元件倾斜角度失调引起输出腔镜上光斑的偏移,随着失调角度的增大,光斑偏移量也不断增大,若光斑偏移量小于  $(a - a_0)/2$ ,光斑能量可以被完全收集,那么不影响反射率测量结果,可以把  $[-\theta_0, \theta_0]$  称为无影响角度失调区间.从图 8 中可以看出,随着腔长的增加无影响角度失调区间减小.当  $\theta > \theta_0$  时,反射率测量

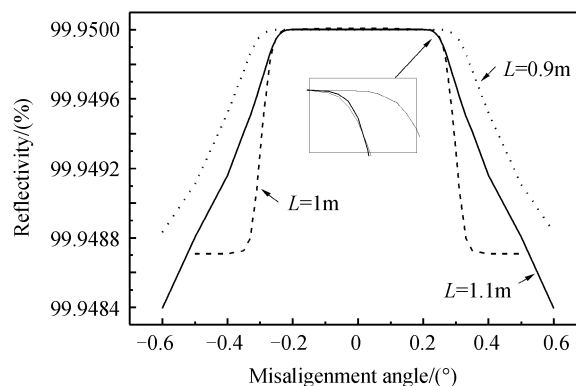


图 8 不同腔长对应的不同失调角度下的反射率测量结果  
 Fig. 8 The reflectivity measurement results with different angular misalignments at different cavity lengths

结果随待测光学元件失调角度的增大开始下降,对称共焦腔中的下降速度大于一般稳定腔。

仿真分析发现,对称共焦腔是一个比较特殊的结构,其仅偶数次光斑有偏移,奇数次光斑没有偏移,若采用对称共焦腔结构测量反射率,在数据采样率足够高的情况下,可以对衰荡信号的上包络进行拟合(即只选取其中的奇数次点),得出衰荡时间,这样就可以得到准确的衰荡时间,消除待测光学元件角度失调的影响。上述的  $L=1.1\text{ m}$  的一般稳定腔结构就优于对称共焦腔,尽管无影响角度失调区间略小于对称共焦腔,从图 8 中就可以看出其反射率测量结果受失调角度影响整体上小于对称共焦腔,且腔长长,反射率测量准确度高。

## 4 结论

本文理论分析了基于 Z 型腔结构的光反馈光腔衰荡技术测量大口径光学元件时,在样品扫描过程中产生的倾斜角度失调对反射率测量结果的影响。根据失调谐振腔光束传输矩阵,建立了 OF-CRD 腔型中输出腔镜光斑偏移量模型。在对称共焦腔情况下,输出腔镜上偶数次光斑的偏移量随样品失调角度的增大而增加,奇数次光斑无偏移,而且偶数次光斑的偏移量还与样品的位置有关;在一般稳定腔中,输出腔镜上奇偶数次光斑均振荡偏移。减小待测光学元件与输出腔镜间的距离有利于降低系统对失调角度的敏感性。在 OF-CRD 腔型的选择过程中,可根据高准确度二维移动平台的非轴向最大角度误差来选择合适的腔长,在保证系统测量准确度的同时尽可能降低角度失调对测量结果的影响。

### 参考文献

- [1] STOLZ C J, RUNKEL M, MCBURNEY M S, *et al.* Metrology of mirrors for the national ignition facility[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 114-120.
- [2] LI Bin-cheng, GONG Yuan. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**: 021203-1-021203-11.  
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**: 021203-1-021203-11.
- [3] DUPAAE A, RISTAU D. Optical interference coatings 2010 measurement problem[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(9): C172-C177.
- [4] YI Heng-yu, LU Bai-da, HU Xiao-yang, *et al.* Influence of length misadjustment on metrical precision by cavity ring-down method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(8): 993-996.  
易亨瑜, 吕百达, 胡晓阳, 等. 腔长失调对光腔衰荡法测量准确度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(8): 993-996.
- [5] YI Heng-yu, LÜ Bai-da, PENG Yong, *et al.* Influence of detector's aperture on metrical precision of ring-down cavity[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(3): 231-236.  
易亨瑜, 吕百达, 彭勇, 等. 探测器孔径大小对衰荡腔测量准确度的影响[J]. *激光技术*, 2004, **28**(3): 231-236.
- [6] YI Heng-yu, LU Bai-da, 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.
- [7] TAN Zhong-qi, WANG Zhi-guo, LONG Xing-wu. A new theoretical derivation of continuous-wave cavity ring-down technology and its application emulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(Sup): 60-63.  
谭中奇, 汪之国, 龙兴武. 连续波腔衰荡法的一种新理论推导方法及其应用仿真[J]. *光子学报*, 2007, **36**(Sup): 60-63.
- [8] ZHANG Wei-hua, LIU Bo, LUO Jian-hua, *et al.* Study of pressure sensor based on fiber loop ring down[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 466-468.  
张卫华, 刘波, 罗建花, 等. 基于光纤环形腔衰落的压力传感器研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 466-468.
- [9] GONG Yuan, LI Bin-cheng, HAN Yan-ling. Optical feedback cavity ring-down technique for accurate measurement of ultra-high reflectivity[J]. *Applied Physics B*, 2008, **93**(23): 355-360.
- [10] GONG Yuan, LI Bin-cheng. Diode laser based continuous-wave cavity ring-down technique for high reflectivity measurement[C]. *SPIE*, 2007, **6723**: 672356-1-672356-6.
- [11] GONG Yuan, LI Bin-cheng, GAO Li-feng, *et al.* Optical feedback and pulsed cavity ring-down techniques for high-reflectivity measurement: a comparison study [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 397-402.
- [12] LI Bin-cheng, QU Zhe-chao, HAN Yan-ling, *et al.* Optical feedback cavity ring-down technique for high reflectivity measurement[J]. *Chinese Optical Letter*, 2010, **8**(Sup): 94-98.
- [13] QU Zhe-chao, LI Bin-cheng, HAN Yan-ling. The influence of optical feedback strength on cavity ring-down technique for high reflectivity measurements[C]. OSA OIC, 2010, ThC3.
- [14] 吕百达. 激光光学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2003: 473-476.

## Influence of Test Mirror's Misalignment on High Reflectivity Measurement with Cavity Ring-down Technique

QU Zhe-chao<sup>1,2</sup>, LI Bin-cheng<sup>1</sup>, HAN Yan-ling<sup>1</sup>

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

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** In the measurement of reflectivity and uniformity distribution of large-aperture optical component, using optical feedback cavity ring-down technique, 2-dimensional scan is required. Angular misalignment of the test component, which is induced during the scanning process, will influence the measurement accuracy. Based on the augmented matrix of the misalignment of optical resonator, the position of the light spots on the output cavity mirror and the influence on the high reflectivity measurement were calculated in the condition of the symmetric confocal resonator and stable resonator. In the symmetric confocal resonator, there was no drift of the odd light spots, while the drift of the even light spots was a constant for one angular misalignment. In the stable resonator, the drift of the odd and even light spots were reciprocating swing. The results show that the influence of the angular misalignment on the high reflectivity measurement is related to the position of the component and the cavity length. The methods of reducing the influence of the angular misalignment of the component on the measurement results are also presented.

**Key words:** Cavity ring-down; Misalignment; High reflectivity; Optical resonator