

文章编号: 0258-7025(2006)03-0399-06

衰荡腔失调下的波形仿真

易亨瑜

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高反射率的精确测量中,光腔衰荡系统的腔失调直接影响着反射率测量结果的精度。根据光束传输变换规律和信号叠加方式,利用最小二乘法进行数据拟合,建立了腔失调对衰荡波形的影响模型。通过数值运算,模拟了不同腔长失调或腔镜倾斜下衰荡信号波形的变化情况。通过比较,与实验结果吻合较好。仿真结果表明,将示波器上的衰荡波形用于衰荡腔的精密调节中,可以提高测量精度。分析给出了衰荡光腔实验调节的两个判据:1)根据衰荡波形的峰值包络线的变化趋势来调节衰荡腔的腔长;2)根据衰荡波形中相邻奇、偶次脉冲幅值的大小对比调节衰荡光腔的腔镜角度。

关键词 测量;反射率;光腔衰荡;失调;孔径

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Misalignment Simulation of Cavity Ring-Down Waveform

YI Heng-yu

(Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract During precise measurement of high reflectivity, cavity misalignment has great influence on reflectivity measurement results of ring-down spectroscopy. According to propagation equation of Gaussian beam and overlap-add of signal, a theory model is set up to research the influence of detector on its ring-down waveform by using data fitting of method of least squares. Applying this model, it is simulated on the computer that ring-down waveform changes with various cavity length maladjustments or mirror's tilt, and the analyses is in good agreement with the experimental results. Results show, in order to improve metrical precision, it is suggested that ring-down signal on the oscillograph should be applied to adjust ring-down cavity. From the results, two kinds of criteria for cavity adjustment methods are proposed. One is that total figure of ring-down waveform should be applied to adjust cavity length maladjustments, the other is that mutuality of adjacent pulse should be applied to adjust cavity mirror' tilt.

Key words measurement; reflectivity; cavity ring-down; maladjustment; aperture

1 引言

光腔衰荡技术可用于光学元件的高反射率的精确测量^[1~7]。在系统硬件确定后,影响反射率测量精度的主要因素是腔长失调、腔镜角度失调、探测器位置误差。文献[8]通过与实验现象的对比,建立了腔长失调对衰荡信号的影响模型。文献[9~11]分别研究了腔长失调、腔镜角度失调或探测器口径对光腔衰荡法测量精度的影响,模拟腔失调下衰荡波形的大致轮廓,提出了利用衰荡波形的对数变换曲

线的形状来指导衰荡腔的精密调节。文献[12]研究了探测器性能对光腔衰荡法测量结果的影响。

在光腔衰荡实验测量中,为了提高测量精度,需要对衰荡腔的腔长、腔镜角度进行精密调节。利用衰荡波形的对数变换曲线的形状进行调节时,由于衰荡信号含有负值,对数变换耗时太大,所以在实验中常根据衰荡波形的原始形状来指导实验的调节。为了指导实验调试,本文对腔失调的两方面分析^[9,10]进行了归纳整理,并考虑到激光脉冲宽度或

收稿日期:2005-06-08;收到修改稿日期:2005-11-08

基金项目:中国工程物理研究院科学技术基金(20030442)资助项目。

作者简介:易亨瑜(1969—),男,重庆人,中国工程物理研究院应用电子学研究所高级工程师,主要从事光学检测技术的研究。E-mail: yihengyu1@sina.com

探测器响应性能^[12],建立了统一的腔失调仿真模型;利用模型对不同程度的腔长失调、腔镜角度失调现象进行了仿真模拟。

2 腔失调理论分析

在光腔衰荡法反射率测量系统中,常选择基模高斯光束作为测量光束,共焦腔为测量腔体。在图1中腔长 L 等于腔镜曲率半径 ρ ,两腔镜 M_1, M_2 的反射率分别为 R_1 和 R_2 。设腔长失调为 β ,腔镜的角度失调为 2ϵ ,两种腔失调现象如图1所示,其中图1(b)给出了角度失调造成的腔轴平移 δ 和腔长附加失调。取腔镜 M_2 处为参考面,由文献[13]可得,从 M_2 反射的光线往返一周的失调 $ABCD$ 矩阵为

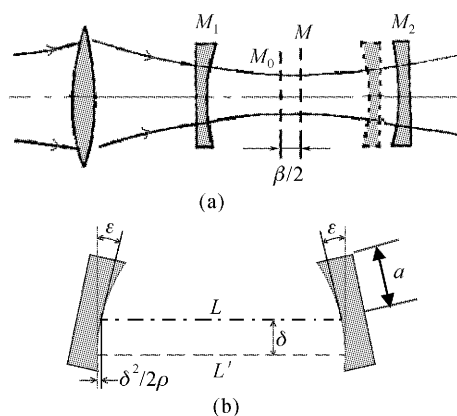


图1 衰荡腔的腔长失调(a)和腔镜角度失调(b)
Fig. 1 Length misadjustment (a) and cavity mirrors' tilt (b) of a ring-down cavity

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & \phi_1 & \chi_1 \\ C_1 & C_1 & \psi_1 & \omega_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L + \beta + (\delta^2/\rho) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/\rho & 1 & 0 & -2\epsilon \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L + \beta + (\delta^2/\rho) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2/\rho & 1 & 0 & -2\epsilon \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_{j+1} \\ \theta_{j+1} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & B_i & \phi_i & \chi_i \\ C_i & C_i & \psi_i & \omega_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_j \\ \theta_j \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据 $ABCD$ 定律,可计算出入射光束第 j 次到达腔镜 M_2 处的光束复参数 Q_j ,曲率半径 ρ_j 和光斑半径 w_j 。分析中取初始光线的入射方向与失调腔的腔轴平行,其光斑漂移量 $\Delta_1 = \delta$,这样由光束复振幅表达式得到失调衰荡腔第 j 次输出脉冲的中心峰值振幅

$$E_j = \frac{\sqrt{(1-R_1)(1-R_2)R_1^j R_2^j}}{w_j} \times \exp\left[-\frac{(r + \Delta_1 - \Delta_j)^2}{w_j^2}\right] \times \exp\left[-\frac{ik(r + \Delta_1 - \Delta_j)^2}{2\rho_j} - ikz\right], \quad (2)$$

探测器接收的衰荡腔第 j 次输出脉冲的中心功率为

$$I_j = \int_0^\phi |E_j|^2 2\pi r dr, \quad (3)$$

式中 ϕ 为探测器的接收半径。根据文献[10]的测量结果,不考虑波形畸变的情况,利用归一化高斯线型来模拟探测器上的单脉冲波形 $f(t)$,公式为

$$f(t) = \exp(-t^2/w^2), \quad (4)$$

式中 w 为波形半径参数,表示激光脉冲半高宽或探

测器响应的时间常数,它决定了相邻脉冲的强度叠加程度。 w 越小表示激光脉冲宽度越小或探测器响应越快。

设 $I(t)$ 为周期性脉冲峰值信号 I_j 和探测器“零信号”本底噪声的集合。这样利用卷积算法可模拟得到示波器上观测的衰荡波形为

$$s(t) = \int f(x)I(t-x)dx. \quad (5)$$

3 模拟计算

取衰荡腔长为 $\rho = 1500$ mm,激光波长 $\lambda = 1.06$ μm ,探测器孔径 $\phi = 0.1$ mm,衰荡次数 $T = 500$ ns,考虑到激光脉冲宽度或探测器响应性能,取探测器的单脉冲波形半径参数 $w = 3$ ns。为使衰荡波形的仿真效果更明显,采用腔镜反射率为 $R_1 = R_2 = 99.5\%$ 。运用上节理论模型,在衰荡腔无失调情况下得到图2。图2(b)相当于将示波器上的波形展宽,但由于示波器存储深度的限制,使观察到的衰荡脉冲个数减少。图3给出了衰荡腔无失调时的实验观测波形及其展宽信号。与图2相比,其衰荡次数

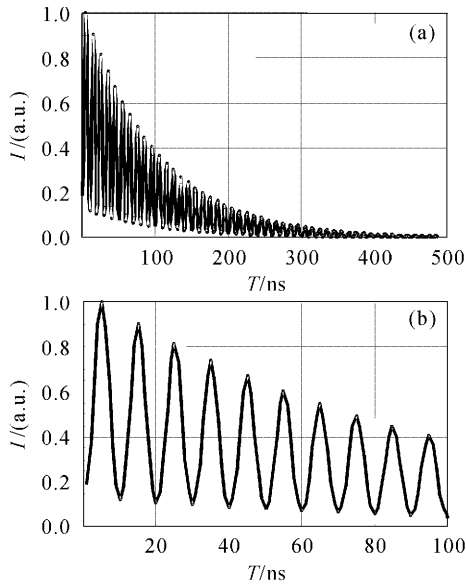


图 2 理想情况下的衰荡波形(a)及其展宽信号(b)
Fig. 2 A ideal ring-down waveform (a) and its megascopic signal (b)

更多,其原因是实验中镜反射率为 99.8176%^[6],故衰荡次数较多而使相邻脉冲的幅值大致相等,但衰荡波形的峰值包络线呈指数函数下降,与图 2 一致。

文献[9,11]的分析表明,只有当衰荡腔无失调时,反射率测量结果才是准确的。如果衰荡腔存在腔长失调或腔镜角度失调,就会导致测量值偏离反射率真实值,表现为衰荡波形发生变化。

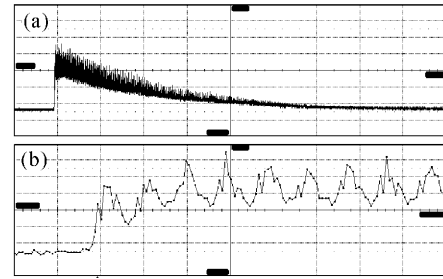


图 3 无腔失调时的衰荡波形(a)及其展宽信号(b)
Fig. 3 A cavity alignment ring-down waveform (a) and its megascopic signal (b)

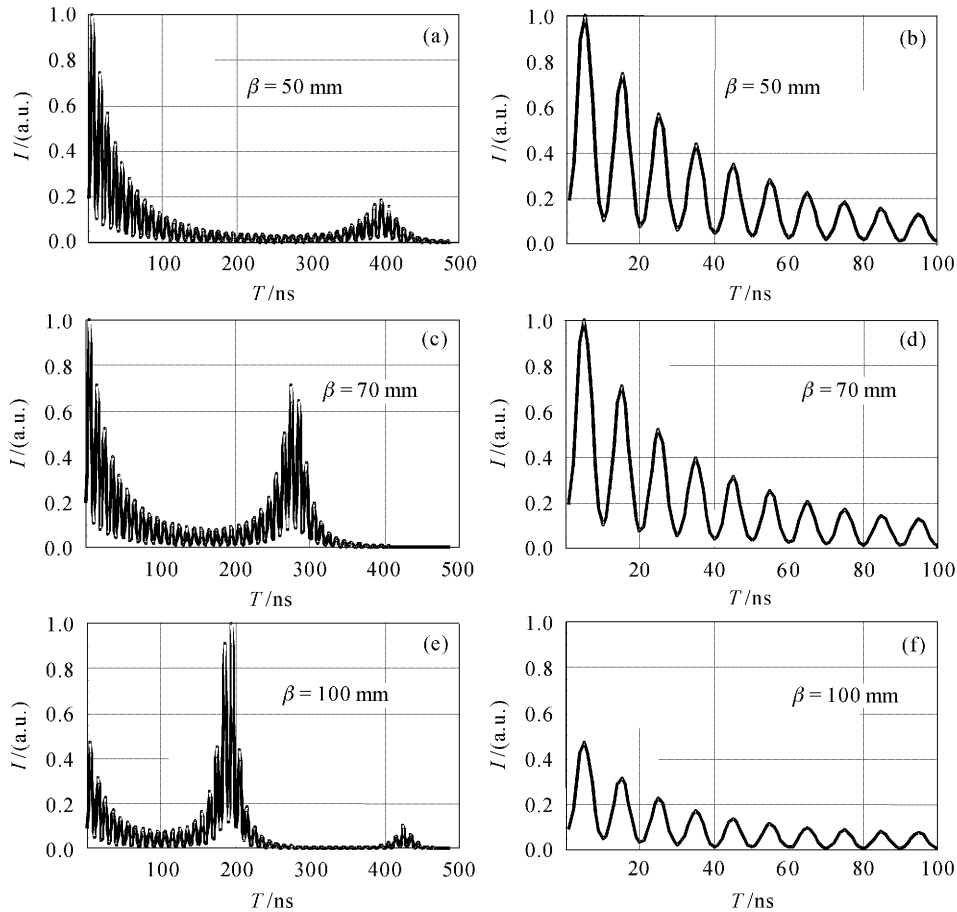


图 4 腔长失调时的衰荡波形(a),(c),(e)及其展宽信号(b),(d),(f)
Fig. 4 Ring-down waveform (a), (c), (e) and its megascopic signal (b), (d), (f) of various length misadjustment

3.1 腔长失调时衰荡波形的仿真模拟

取腔长失调量 β 为正数, 并逐渐增大 β , 通过数值计算, 可得到不同失调量下的衰荡波形图及其展宽信号如图 4(a), (c), (e) 和 (b), (d), (f) 所示。对比图 2 和图 4 可以看到, 腔长失调导致衰荡腔输出光斑半径的变化, 出现了探测信号幅值调制现象。当 β 值不断增大时, 则衰荡曲线在下降过程中将会出现一个尖峰, 而且该尖峰的幅值越来越大, 在时间上也进一步提前; 若 β 值再进一步增大, 曲线在下降过程中将会出现多个尖峰。这与实验中观察到的现象基本一致。经分析认为, 腔长失调使衰荡腔输出光斑半径呈现周期性变化, 经过探测器有限孔径的部分接收, 导致了探测信号幅值的强弱调制现象。当然尖峰的出现与腔镜反射率、输出激光的脉冲能量、探测器的接收孔径大小以及探测器的响应灵敏度等因素有关。为了提高测量精度, 首先需要更高的腔镜反射率、激光脉冲能量和响应更灵敏的探测器, 可以得到更多的衰荡脉冲波形, 这样对腔长失调现象的观察更灵敏。其次若探测器的口径越大, 则

出现一个尖峰所需要的 β 值越大, 这样可增大失调容差, 提高测量精度并降低实验调节难度。图 5 给出了采样率较低时腔长失调前后的衰荡波形, 与图

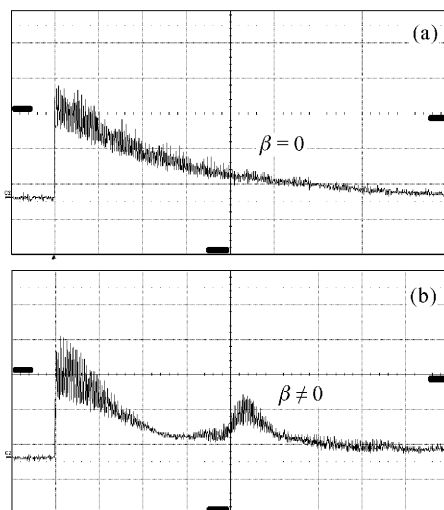


图 5 不同腔长失调下的衰荡波形
Fig. 5 Ring-down waveform of various length misadjustment

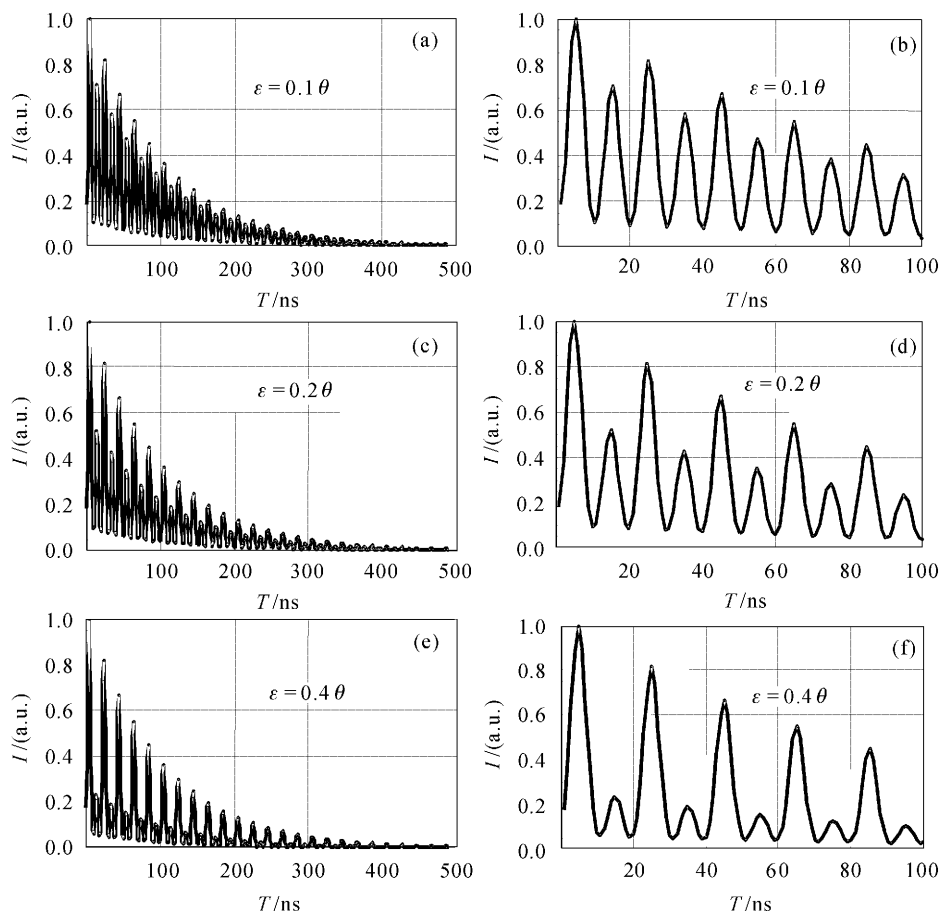


图 6 不同腔镜角度失调量下的衰荡波形(a), (c), (e)及其展宽信号(b), (d), (f)

Fig. 6 Ring-down waveform (a), (c), (e) and its megascopic signal (b), (d), (f) of various cavity mirrors' tilt

2(a)和图 4(c)基本一致。文献[8]利用该模型,在未考虑到激光脉冲宽度及探测器响应性能下,得到了不同腔长失调量下的衰荡波形的大致包络,与实验现象吻合较好。

3.2 腔镜角度失调时衰荡波形的仿真模拟

计算可得腔内本征基横模的半径为 0.581964 mm,由瑞利判据得到实验中肉眼调节的最小失调角为 $\theta = \omega_{00}/2L = 1.45491 \times 10^{-4}$ rad。取探测器的单脉冲波形半径参数 $\tau = 3$ ns,运用上节理论模型得到不同腔镜角度失调量 ϵ 下的衰荡波形及其对应的展宽信号,如图 6(a)~(f)所示。

由图 2 和图 6 的对比可以看到,无倾斜失调时,衰荡波形的脉冲幅值依次下降;腔镜角度失调导致衰荡腔输出波形中奇、偶次脉冲幅值出现大小交替变化。腔镜角度失调量越大,则衰荡曲线中偶次脉冲的幅值将越小,这与观察到的实验现象一致。仿真模拟表明当腔镜角度失调量大于 θ 后,偶次衰荡脉冲消失,在衰荡曲线中只剩奇数次脉冲。图 7 给出了腔镜倾斜前后衰荡波形中相邻脉冲信号的变化情况,可以看到腔镜的微小倾斜,使偶次脉冲信号幅值下降。实验中若继续增大腔镜的倾斜角度,可以看到偶次衰荡脉冲消失,并伴随出现腔长失调引起的衰荡波形的峰值包络线的强度调制现象。这是因为腔镜角度失调转换为相应的腔长失调量,如图 1(b)所示。这要求在精密调节时首先要解决腔镜的角度失调。

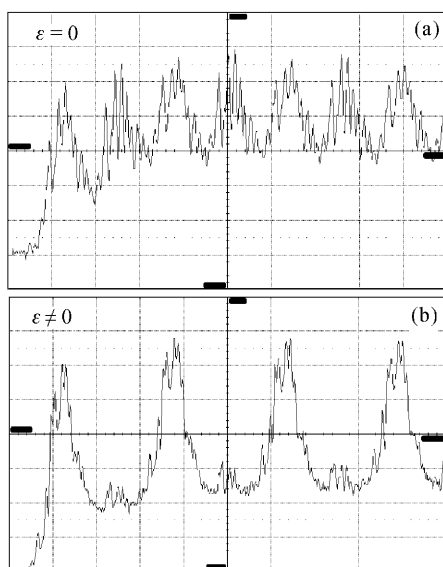


图 7 腔镜倾斜前后的衰荡波形
Fig. 7 Ring-down waveform of various cavity mirrors' tilt

4 结 论

通过对衰荡波形信号的仿真模拟,可以看到,在衰荡腔没有失调的情况下,衰荡波形的脉冲幅值依次下降。腔长失调影响着衰荡波形的峰值包络线;当腔长失调量逐渐增大时,衰荡曲线在下降过程中将会出现一个尖峰,而且该尖峰的幅值越来越大,在时间上也进一步提前,以至于曲线在下降过程中将会出现多个尖峰。腔镜的角度失调导致衰荡腔输出波形中奇、偶次脉冲幅值出现大小交替变化;角度失调量越大,则衰荡曲线中偶次脉冲的幅值将越小。

通过仿真模拟,可以清楚地认识到实验调节中出现的各种腔长失调、腔镜倾斜失调现象,从而对腔长、腔镜角度的精密调节提供了一定的理论指导。根据仿真结果可以得到调节衰荡光腔的两个判据:1) 根据衰荡信号的峰值包络线的变化趋势来调节衰荡光腔的腔长;2) 根据衰荡信号中奇、偶次脉冲幅值的相互大小来调节衰荡光腔的腔镜角度。

参 考 文 献

- 1 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12):2544~2551
- 2 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8):1238~1245
- 3 Sun Fuge, Dai Dongxu, Xie Jinchun *et al.*. Accurate reflectivity measurement of high reflective mirrors via a cavity ring-down method [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):35~38
孙福革,戴东旭,解金春等. 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, **A26**(1):35~38
- 4 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. 用光腔衰荡测定腔镜及镜片的反射率[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(1):71~73
- 5 Ren Gang, Cai Bangwei, Xiong Shengming *et al.*. Reliability estimation of the precise measurement system for the high reflectivity of COIL mirrors [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2004, **16**(11):1393~1396
任 钢,蔡邦维,熊胜明等. COIL 腔镜高反射率精密测量系统的可靠性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(11):1393~1396
- 6 Yi Hengyu, Peng Yong, Tian Xiaoqiang *et al.*. Experimental study on reflectivity measurement of single wavelength by cavity ring-down method [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(4):337~339
易亨瑜,彭 勇,田小强等. 光腔衰荡法的单波长反射率测量实验研究[J]. *激光技术*, 2005, **29**(4):337~339
- 7 Yi Hengyu, Lü Baidai. The advance of techniques of reflectivity measurement [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5):459~462
易亨瑜,吕百达. 反射率测量技术研究的进展[J]. *激光技术*, 2004, **28**(5):459~462
- 8 Yi Hengyu, Peng Yong, HU Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment of ring-down cavity on its output power

- [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **31**(Suppl.):486~488
易亨瑜,彭 勇,胡晓阳等. 衰荡腔腔长失调的实验分析[J].
中国激光, 2003, **31**(增刊):486~488
- 9 Yi Hengyu, Lü Baida, Hu Xiaoyang *et al.*. Influence of length misadjustment on metrical precision by cavity ring-down method [J]. *High Power Laser and Partical 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精度的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(8):993~996
- 10 Yi Hengyu, Lü Baidai, Zhang Kai. Analysis of cavity mirrors' tilt in ring-down cavity [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1) (to be published)
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) (待发表)
- 11 Yi Hengyu, Lü Baida, 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精度的影响[J]. *激光技术*, 2004, **28**(3):231~236
- 12 Yi Hengyu, Lü Baida, Zhang Kai *et al.*. Influence of detector responsibility on its metrical result of ring-down cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):997~1000
易亨瑜,吕百达,张 凯等. 探测器性能对光腔衰荡法测量结果的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):997~1000
- 13 Lü Baidai. *Laser Optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Publishing Company, 1992. 168~170
吕百达. *激光光学*[M]. 成都:四川大学出版社, 1992. 168~170