

文章编号: 0253-2239(2009)03-0718-05

用扫描激光频率腔衰荡对超低损耗镜片的测量

李志刚 张玉驰 张鹏飞 李园 李刚 王军民 张天才

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 光电研究所山西大学 山西 太原 030006)

摘要 超低损耗光学镜片(超镜)是构建高品质光学腔和进行许多光学测量的重要器件,对损耗在百万分之一水平的高质量镜片的测量是一个重要的课题。通过在扫描腔长的情况下调节腔的起振模式,然后在腔的 TEM_{00} 模式附近扫描激光频率实现了注入激光和腔的 TEM_{00} 模的有效匹配;以迟滞比较电路触发下的光开关控制注入光场的方式获得了连续激光腔衰荡信号;实验中完成了同一批损耗在 10^{-6} 量级的超高反射率镜片的批量测量,实测最高反射率镜片的反射率为 $(99.99914 \pm 0.00004)\%$,测量精度优于 10^{-6} 。结果表明对于同一批相同工艺生产以及相同存储环境存放的超镜,其损耗也存在较大差异。

关键词 激光技术; 光腔衰荡; 超高反射率镜片; 反射率测量

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0718

Measurement of Ultra-Low Loss Mirrors by Cavity Ring-Down Technique with Laser Frequency Sweeping

Li Zhigang Zhang Yuchi Zhang Pengfei Li Yuan

Li Gang Wang Junmin Zhang Tiancai

State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Device,

(Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract Ultra-low loss mirror (super-mirror) is an important optical element for high-quality optical cavity and optical sensitive measurements in many fields, and the measurement of mirror losses on 10^{-6} level is an important issue. We have effectively mode-matched the incident beam to the TEM_{00} mode of cavity by scanning cavity length and sweeping laser frequency near the TEM_{00} mode of cavity. An optical switch triggered by a hysteresis comparator was employed to cut off the incident laser beam and the cavity ring-down (CRD) signal was obtained. We have measured a batch of super-mirror with losses on 10^{-6} level. The precision of this system is better than 10^{-6} , and the highest reflectivity is $(99.99914 \pm 0.00004)\%$. The results indicate that the losses of super-mirrors are diverse even if the super-mirrors are from the same batch and stored in the same environment.

Key words laser technique; cavity ring-down; ultra-low loss mirror; reflectivity measurement

1 引 言

超低损耗镜片(超镜, Super-mirror)反射率通常可达 0.9999 以上,在高精度光学测量^[1]、光谱分析^[2]、量子光学^[3]和引力波探测^[4]中有广泛应用。而对于损耗在 10^{-6} 量级的超镜反射率的精确标定

是进行各种精确测量和研究的基础。由于超镜在镀膜过程中微小的工艺差别以及存放环境的不同都会造成超镜损耗的改变,即使同一批经过相同工艺制作的镜片,其损耗也存在微小差异。因此设计一种便捷精确的测量超低损耗镜片的方法无论对镜片生

收稿日期: 2008-06-24; 收到修改稿日期: 2008-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(10434080, 60578018, 60808006, 60821004)、国家 973 计划(2006CB921102)、山西省青年科技研究基金(2008021003)和明星专项项目(08121019)资助课题。

作者简介: 李志刚(1983-),男,硕士研究生,主要从事原子物理和激光技术方面的研究工作。

E-mail: lzg2002261017@126.com

导师简介: 张天才(1966-),男,理学博士,主要从事量子光学、原子物理和腔量子电动力学方面的研究工作。

E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

产商提高镀膜工艺还是对使用者高效使用镜片都十分必要的。

对于镜片损耗的测量国内外已有若干小组发展了一系列的测量方法^[5~13],其中光腔衰荡法(Cavity ringdown, CRD)^[14]由于其对光源功率起伏不灵敏以及衰荡特征时间与待测光学腔损耗(光学镜片)成反比的优点而被广泛应用。特别对于连续激光光腔衰荡法可以实现对待测光学腔单个模式的高效匹配,获得较高的信噪比^[11],从而被广泛用来测量腔内损耗。Anderson等人将激光光源注入光学腔并利用电光调制器(Pockels' cell)瞬时关断光场,由光场在腔内的寿命确定了腔镜反射率,其测量精度为 5×10^{-5} ^[7]。但此方法无法判断激光模式与光腔本征模式的匹配程度^[7,11],可能对腔高阶模式进行测量。Rempe等人采用压电陶瓷(PZT)调节腔长,通过测量光腔衰减信号可以确定 10^{-7} 的腔镜损耗,并得出对应于高阶横模的腔内损耗比相应的 TEM_{00} 模高40%^[5]。Romanini等人提出了基于压电陶瓷调制的腔信号用于腔损耗测量的方法,研究了精细度在 10^4 量级的光学腔,指出压电陶瓷的非线性响应会引入1%左右的误差。本课题组采用不同扫描速度下的腔衰减振荡信号研究了精细度在 10^5 量级的光学腔,得到了腔的损耗为 30×10^{-6} ^[13]。Dotsenko采用连续激光光强衰荡的方法系统研究损耗小于 1×10^{-6} 的超镜给出了镜片透射损耗、吸收散射损耗,并研究了镜片双折射导致正交方向上损耗的差异^[15]。谭中奇等人对模式失配对连续波腔衰荡技术测量的影响进行了系统的分析得到当腔的非涅耳数较大时,模式失配主要影响无源腔出射光功率的大小,而对其衰荡特征影响不大的结论^[16]。同年Haifeng Huang等人分析得到了腔衰荡谱的噪声来源于模式匹配中不同模式之间相互干涉^[17]。

为实现激光模式与光腔本征 TEM_{00} 模式高效匹配并消除压电陶瓷非线性响应对测量精度的影响,本文通过在扫描腔长的情况下调节腔的起振模式,然后在腔的 TEM_{00} 模式附近扫描激光频率避免激发腔的高阶模式实现了注入激光和腔的 TEM_{00} 的有效匹配;以迟滞比较电路触发下的光开关控制注入光场的方式获得了连续激光光腔衰荡信号,测量精度达到 1×10^{-6} 。通过测量不同镜片组成的光学腔的损耗确定了同一批超镜中不同镜片各自的损耗,结果表明对于同一批相同工艺生产以及相同存储环境存放的超镜,其损耗也存在明显差异。

2 实验原理和实验设计

假设待测光学法布里-珀罗(F-P)腔两腔镜的反射率分别为 R_1, R_2 ,腔长为 d ,腔内空气的吸收损耗系数为 α 。当光学腔和人射光场耦合并且入射光场与待测腔共振时,入射光场在腔内相干叠加建立起腔内光场。此时如果瞬时关断入射光,腔内光功率的衰减可表示为^[7]

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

其中 I_0 为关断入射光时刻腔内的光功率, τ 为腔场的寿命, τ 可表示为

$$\tau = Fd/(\pi c), \quad (2)$$

其中 c 为光在腔中的传播速率, d 为腔的长度, F 为光腔的精细度。精细度 F 有如下关系:

$$F = \frac{\pi [R_1 R_2 \exp(-\alpha d)]^{1/4}}{1 - [R_1 R_2 \exp(-\alpha d)]^{1/2}}. \quad (3)$$

由此可见如果实验中可精确测定腔场的寿命,即可确定腔的损耗。而腔场的寿命可以通过分析腔衰荡信号获得,故实验中获得真实的腔衰荡信号是测量的关键所在。对于由光开关和有限带宽的探测器构成的测量系统,光开系统响应时间要远小于腔场的寿命以保证输出的光场衰荡信号是无补给的腔场的单一指数衰竭信号,也就是腔输出信号可以用式(1)表示;用于探测腔衰荡信号的探测系统的响应时间会直接影响信号探测的精准度。在考虑探测系统的响应时间的情况下,探测系统输出的信号可以表示为^[19]

$$I(t) = A[\exp(-t/\tau) - \frac{\tau_0}{\tau} \exp(-t/\tau_0)] + A_0, \quad (4)$$

其中 τ 表示腔场的寿命, τ_0 表示探测系统的响应时间, A 为振幅因子, A_0 表示腔衰荡信号中的直流偏置。

由(4)式可知,要获得真实的腔衰荡信号探测系统的响应时间应该 τ_0 远小于腔场的寿命 τ 。也就是说,只有当腔的寿命远大于测量过程中使用的仪器的响应时间时,实验中得到的腔衰荡(CRD)信号才能用单一指数拟合。

实验中设计的光开系统响应时间和延迟时间分别为15 ns和400 ns、探测系统的响应时间小于10 ns(探头带宽50 MHz、使用的存储示波器的带宽500 MHz)。基于上面的分析,实验中搭建了长度为10 mm的光学腔其对应衰荡时间为4.2 μ s。这样的情况下整个系统满足上面提到的开关和探测

器响应时间的要求,实验装置如图 1 所示。

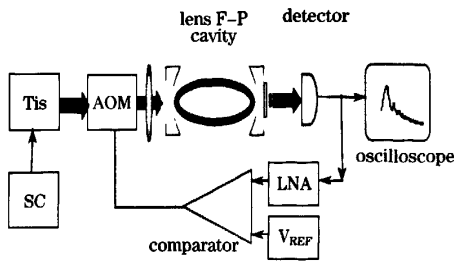


图 1 实验装置图: SC, 激光频率扫描控制系统; Ti:S, 钛宝石单模单频激光器; AOM, 声光调制器; LNA, 低噪声前置放大器; V_{REF} , 参考电压

Fig. 1 Experiment setup for cavity ring-down with a frequency-sweep laser. SC, scanning controller; Ti:S, Ti:sapphire laser; AOM, the acousto-optic modulator; lens, the optical lens for mode matching; LNA, the low-noise amplifier; V_{REF} , reference voltage

实验中,待测镜片为 Research Electro-Optics 提供。其中心波长在 852 nm, 设计的标称透射率 $T=8 \times 10^{-6}$ 、凹面曲率半径 $\rho=50$ mm、直径 7.8 mm 和厚度为 4 mm。利用两片超镜组成光学腔,其中一片超镜固定在压电陶瓷上构成几何长度为 $d=10$ mm 的 F-P 腔,连续钛宝石单模单频激光器输出的 852 nm 的激光经声光调制器产生的 +1 级光,经焦距 $f=80$ mm 的透镜耦合注入待测腔,光场和光学腔的 TEM_{00} 模式匹配效率高于 85%。声光调制器和迟滞比较电路组成光开关,可以由腔输出信号触发迅速关断入射光。腔的透射光场由快速探测器 (PerkinElmer, C30659-900-R8A) 接收,探测器输出电信号分成两路:一路输入数字存储示波器 (Agilent, 54810A) 记录,另一路经低噪声前置放大器 (Stanford Research Systems, SR560) 放大后输入比较电路控制声光调制器。

为提高镜片测量精度,待测腔体采用殷钢材料的整体结构,放置在经过空气净化的环境中。在调节腔与激光模式匹配过程中,用以监视腔匹配情况的透射信号通过扫描压电陶瓷获得。在扫描压电微位移器 (PZT) 实现光场和光学腔的 TEM_{00} 模式匹配效率高于 85% 后,以扫描周期为 5. s 的频率在 10 GHz 范围扫描激光频率用 TEM_{00} 模的透射峰触发开关系统的方法获得腔的透射衰荡信号,此处 10 GHz 的扫描范围是实验中仅观测到 TEM_{00} 所允许的最大扫描范围。

在调节匹配的过程中,还采用 CCD 观测腔的出

射光斑的方法以确定腔共振的模式是 TEM_{00} 模式。实验中如果将光场匹配到了腔的某个高阶模式上,由于高阶模式在镜面上的光斑比 TEM_{00} 模式的光斑大,故衍射损耗较大从而损耗增加^[5]。另外如果光场匹配不当导致腔内 TEM_{00} 模式和其他模式的幅度相当,腔内共存的多个模式之间将发生明显干涉引起测量结果的不确定性^[18]。但由于实验以 TEM_{00} 模的透射峰触发开关故不存在高阶模对测量结果的影响,匹配效率高于 85% 仅是为了保证有足够强的 TEM_{00} 信号用以触发开关,实验中也将在模式匹配到高于 95% 后进行过测试,发现和模式匹配到 85% 测量的结果没有区别。

在光腔与激光模式匹配效率高于 85% 时,切换扫描方式至扫描激光频率同时把开关系统打开即可获得到的激光光腔衰荡信号,如图 2 所示。当入射光的频率经过扫描靠近待测光腔的 TEM_{00} 模式本征频率时,腔 TEM_{00} 模与输入光场近共振,腔内光子数迅速增加。由于输出镜透射率一定,输出光场经快速探测器转换的电信号也呈现增加趋势 (A 区);当入射光频率靠近腔的 TEM_{00} 共振中心频率,使得输入开关系统的触发信号大于迟滞比较电路工作的上门限电压时,控制输入声光调制器 (AOM) 的射频信号切断,此时输入光也被关断。由于光腔的损耗不为零且腔外无补给光子的入射光,此时腔内光子数随时间呈指数衰减,输出场经快速探测器转换的电信号也呈指数衰减 (B 区)。图中 C 区为输出场经快速探测器转换的电信号输入光开关系统的触发信号小于迟滞比较电路的下门限电压时,控制 AOM 射频信号的 TTL 信号切换至高电平

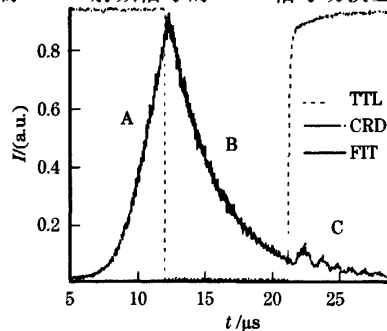


图 2 实验中观测到的透射的腔衰荡信号。其中, TTL 为迟滞比较电路输出控制声光调制器的触发信号、CRD 为透射的腔衰荡信号、FIT 为指数衰减理论拟合结果

Fig. 2 The result of transmission signal from the cavity; CRD, TTL, the trigger signal for switch of (on) the input beam; FIT, fitting result

状态,由于输入光场与腔仍处于近共振区域而出现的连续光场腔衰荡信号。通过调节低噪声前置放大器(LNA)的放大倍数和参考电压,可控制输出透射信号中A、B、C区的比例。当LNA工作在使输入光开关系统始终小于上门限电压时,透射信号仅由A和C组成。同样也可实现透射信号仅由A和B组成。此处选A、B和C同时存在是为了呈现整个过程,且在数据拟合时更方便确定范围(如FIT所示)。根据上述结果,实验的测量拟合误差小于1%。

3 实验结果和误差分析

在腔镜损耗 $L_i = 1 - R_i$ 远小于以1且不区分镜片损耗来源(镜片损耗主要包括表面缺陷导致的散射、镜片的衍射和透射损耗)待测腔的精细度 F 可近似为

$$F = \frac{2\pi}{L}, \quad (5)$$

$$L = L_i + L_j = L_{i,j}, \quad (6)$$

其中 L 代表两片腔镜损耗之和, L_i, L_j 分别为两腔镜各自的损耗。

通过测量不同腔镜组合的光学腔内光场的寿命,可得到两腔镜的损耗之和。实验对8片待测超镜(编号为1-8)两两组合进行测量,步骤如下:选定编号为1、7、8的三片超镜,两两组合可得此3片镜片损耗的三元组合方程组,并由此确定各个镜片的损耗。其次,以镜片1为参考镜片(在暗场显微镜下观测发现镜片1的表面缺陷较少),其他编号镜片与其组合进行测量。特别地,腔内光场寿命取10次测量结果指数拟合的平均值,如表1所示。

表1 不同标号超镜组合下光腔测量的结果

Table 1 Measurement results of the cavities consisted with different super-mirrors

Parameter	Ring cavity number							
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	7-8
$\tau / \mu\text{s}$	3.18	2.55	2.94	2.71	3.41	3.64	3.36	3.58
$F / 10^4$	30.0	24.0	27.7	25.5	32.1	34.3	31.7	33.8
$\Sigma L_{\text{Loss}} / 10^{-6}$	21.0	26.2	22.7	24.6	19.6	18.3	19.8	18.6
$(\Delta\tau/\tau) / \%$	1.9	1.0	1.5	0.9	0.6	2.0	1.7	1.4

由式(5)和(6)可得镜片损耗表达式如下

$$L_1 = (L_{1,8} + L_{1,7} - L_{7,8})/2, \quad (7)$$

$$L_n = L_{n,1} - L_1, \quad n = 2, 3, 4, 5, 6. \quad (8)$$

实验中根据组合误差分析^[20]可知,由于实验中实验数据通过采用相同仪器在相同的条件下测量所得,故测量结果误差以系统误差为主,各个量的误差

可视为整体关联的情况,有

$$\Delta L_1 = |\Delta L_{1,8} + \Delta L_{1,7} - \Delta L_{7,8}|/2, \quad (9)$$

$$\Delta L_n = |\Delta L_{n,1} - \Delta L_1|, \quad (10)$$

其中腔总损耗的绝对误差由下式给出:

$$\Delta L = \left(\frac{\Delta\tau}{\tau} + \frac{\Delta d}{d} \right) \times L. \quad (11)$$

腔长的误差 Δd 由游标卡尺测量的精度决定。实验中游标卡尺引入的误差小于0.1 mm, 对应于腔长相对误差小于1%, 该长度测量的精度可以通过光学测量的方法大大提高^[12~13]。将表1的结果代入(7)-(11)式可得1-8号超镜的损耗如图3所示。根据测量结果,编号为7的镜片损耗最小,为 $L = 8.6 \times 10^{-6}$, 对应的反射率为 $(99.99914 \pm 0.00004)\%$ 。测量精度对于所有镜片都优于 10^{-6} 。分析测量误差主要来自几个方面,首先,长度测量采用了机械测量,这种测量的精度不够高,误差在0.1 mm(通过调整入射光的方向可以保证光斑中心位于镜片中心不大于3 mm的区域,从而已经考虑了两镜凹面上光斑中心位置之间的距离),导致对损耗的精度影响在1%。当然,实验中如果用光学方法,包括干涉或者边带调制等,可以把腔长的相对误差减小到0.01%,在前期微光学腔测量中使用过光学测量的方法^[13],希望在后续50~100 mm的腔上采用光学方法进一步提高测量精度;其次镜面上不同部分的损耗存在差异,而实验中无法保证每次测量时光斑在镜片的同一部分从而导致系统误差;第三,虽然短的腔长在一定程度上降低了系统对外界震动的敏感以及降低了模式匹配的难度,但腔长选取比较短而导致衰荡时间不够长制约了测量精度的提高,寻求合适的腔长以达到稳定性和长的腔衰荡时间,仍然是一个值得研究的问题。最后,实验测量精度不是实验测量值和镜片标称值比较得出来的,而采用了一些国外研究组报道的方法^[5~7,9~10]。原

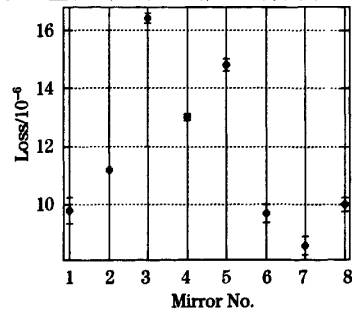


图3 8片超镜损耗测量结果

Fig. 3 The losses of super-mirrors from No. 1 to No. 8

因主要是镜片生产商提供的标称值只能作为参考, 供应商也不能确定其准确性, 镜片在存放中和清洁时造成的损伤也会导致损耗的变化. 所以此处以多次实测损耗的平均值作为镜片的“真实值”, 而测量值相对于平均值的起伏作为测量精度.

4 结 论

采用在腔的 TEM₀₀ 模式附近扫描激光频率, 通过自行设计的触发光开关控制连续激光, 利用光腔衰荡法测量一组超镜的损耗, 测量精度高于 10⁻⁶. 实测超镜的最高反射率为 (99.99914 ± 0.00004)%. 结果表明对于同一批相同工艺生产以及相同存储环境存放的超镜, 其损耗也存在明显差异. 该实验测试方法可用于批量低损耗镜片的筛选工作, 可以快速地确定损耗在 10⁻⁶ 量级的低损耗镜片.

参 考 文 献

- 1 G. H. Atkinson. *Cavity-Enhanced Absorption; Interacavity Laser Spectroscopy in Cavity Enhanced Spectroscopies* [M]. R. D. Zee and J. P. Looney, eds. Academic, 2002
- 2 G. Berden, G. Meijer, W. Ubachs. *Spectroscopic Applications Using Ring-Down Cavities in Cavity Enhanced Spectroscopies* [M]. R. D. Zee and J. P. Looney, eds. Academic, 2002
- 3 H. J. Kimble. *Structure and Dynamics in Cavity Quantum Electrodynamics, in Cavity Quantum Electro-Dynamics* [M]. P. R. Berman, ed. Academic, 1994
- 4 D. Coyne. Precision engineering in the laser interferometer gravitational-wave observatory (LIGO) [C]. *Proc. the 2nd German-American Frontiers of Engineering Symposium*, sponsored by the National Academy of Engineering, Univ. of California, Irvine, 8~10 April 1999
- 5 G. Rempe, R. J. Thompson, H. J. Kimble. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1992, 17(5):363~365
- 6 J. M. Herbelin, J. A. McKay, M. A. Kwok *et al.*. Sensitive measurement of photon lifetime and true reflectances in an optical cavity by a phase-shift method [J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(1): 144~147
- 7 D. Z. Anderson, J. C. Frish, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time [J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(8): 1238~1245
- 8 K. An, C. Yang, R. R. Dasari *et al.*. Cavity ring down technique and its application to the measurement of ultraslow velocities [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(9): 1068~1070
- 9 J. Poirson, F. Bretenaker, M. Vallet *et al.*. Analytical and experimental study of ringing effects in a Fabry-Pérot cavity; Application to the measurement of high finesse [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1997, 14(11):2811~2817
- 10 J. W. Hahn, Y. S. Yoo, J. Y. Lee *et al.*. Cavity ringdown spectroscopy with a continuous-wave laser; calculation of coupling efficiency and a new spectrometer design [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1999, 38(9):1859~1866
- 11 N. J. Leeuwen, J. C. Dietrich, A. C. Wilson. Periodically locked continuous-wave cavity ring down spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(18): 3670~3677
- 12 G. Li, Y. C. Zhang, Y. Li *et al.*. Precision measurement of ultralow losses of an asymmetric optical microcavity [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(29): 7628~7631
- 13 Li Liping, Liu Tao, Li Gang *et al.*. Measurement of ultra-low losses in optical super-cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(5): 1401~1405
李利平, 刘涛, 李刚等. 超高精度光学腔中低损耗的测量 [J]. *物理学报*, 2004, 53(5):1401~1405
- 14 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity ring-down spectroscopy; Experimental schemes and applications [J]. *Int. Rev. Phys. Chem.*, 2000, 19(4): 565~607
- 15 I. Dotsenko. *Single Atoms on Demand for Cavity QED Experiments* [D]. PhD thesis, Bonn university, 2007, 45~67
- 16 Tan Zhongqi, Long Xingwu. Influence of mode mismatch on measurement of continuous-wave cavity ring-down technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, 34(7): 962~966
谭中奇, 龙兴武. 模式失配对连续波腔衰荡技术测量的影响 [J]. *中国激光*, 2007, 34(7):962~966
- 17 Haifeng Huang, Kevin K. Lehmann. Noise in cavity ring-down spectroscopy caused by transverse mode coupling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14):8745~8759
- 18 YiHengyu, Lü Baida, Zhang Kai *et al.*. Influence of detector responsibility on its metrical result of ring-down cavity [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(7):997~1000
易亨瑜, 吕百达, 张凯等. 探测影响应特性对光腔衰荡减法测量结果的影响 [J]. *中国激光*, 2005, 32(7): 997~1000
- 19 Yuan Gong, Bincheng Li. Effect of instrumental response time in exponential-decay based cavity ring-down techniques for high reflectivity measurement [C]. SPIE, 2007, 6720 (67201E)
- 20 M. Drog. *Dealing with uncertainties* [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007