

光腔衰荡法数据截取对时间常数测量精度的影响分析

张金玉 金尚忠 张彪 吴磊 俞兵 袁良 黎高平

Influence of cavity ring-down data interception on time constant measurement accuracy

ZHANG Jinyu, JIN Shangzhong, ZHANG Biao, WU Lei, YU Bing, YUAN Liang, LI Gaoping

引用本文:

张金玉, 金尚忠, 张彪, 等. 光腔衰荡法数据截取对时间常数测量精度的影响分析[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 153–158. DOI: 10.5768/JAO202344.0103006

ZHANG Jinyu, JIN Shangzhong, ZHANG Biao, et al. Influence of cavity ring-down data interception on time constant measurement accuracy[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 153–158. DOI: 10.5768/JAO202344.0103006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

天幕立靶探测光幕响应时间一致性测量方法研究

Measurement method of response time consistency for sky screens vertical target

应用光学. 2019, 40(3): 483–488 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303005>

基于数据挖掘的光纤通信网络异常数据检测研究

Research on abnormal data detection of optical fiber communication network based on data mining

应用光学. 2020, 41(6): 1305–1310 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0608003>

基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究

Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method

应用光学. 2019, 40(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503003>

加速度场下陀螺光纤环形变的影响分析

Analysis of influence of acceleration field on deformation of gyro fiber-optical ring

应用光学. 2021, 42(2): 360–370 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0208001>

影响光电侦察系统目标定位精度因素分析

Analysis and study on influence factors of target geo-locating accuracy for electro-optical reconnaissance system

应用光学. 2018, 39(1): 1–6 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101001>

基于自适应SRUKF的无人机位姿预测方法

Adaptive square-root unscented Kalman filter for position and pose prediction of UAV

应用光学. 2019, 40(1): 21–26 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0153-06

光腔衰荡法数据截取对时间常数 测量精度的影响分析

张金玉¹, 金尚忠¹, 张彪², 吴磊², 俞兵^{2,3}, 袁良^{2,3}, 黎高平²

(1. 中国计量大学 光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065;
3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 光腔衰荡方法是当前测量光学元件超高反射率 (反射率>99.9%) 的唯一方法。介绍了一种对光腔衰荡法中激光信号强度与时间关系的优化提取方法。设计了基于光腔衰荡法的光学元件超高反射比的测试系统, 通过对采集的光腔衰荡曲线数据进行分段指数拟合, 将光腔衰荡曲线数据分为5段, 对每段指数拟合结果对应的 R^2 (R-square) 和 RMSE (root mean squared error) 值进行对比分析, 计算每段指数拟合的衰荡时间。实验结果表明: 截取光腔衰荡曲线数据 40%~60% 部分拟合得到的结果最接近真实值, 求得对应的腔镜的反射率为 99.988 977%。最后通过与腔镜的自身反射率进行比较, 表明该种数据拟合方法能有效地测量腔镜的反射率, 并能减小实验数据本身带来的误差。

关键词: 光腔衰荡技术; 一次指数函数拟合; R^2 ; RMSE

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0103006

Influence of cavity ring-down data interception on time constant measurement accuracy

ZHANG Jinyu¹, JIN Shangzhong¹, ZHANG Biao², WU Lei², YU Bing^{2,3}, YUAN Liang^{2,3}, LI Gaoping²

(1. College of Optical and Electronic Science Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 3. School of Optics and Photonics, Beijing
Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The cavity ring-down method is currently the only method for measuring ultra-high reflectivity (reflectivity is greater than 99.9%) of optical elements. An optimal extraction method for the relationship between laser signal intensity and time in cavity ring-down method was introduced, and a test system for ultra-high reflection ratio of optical elements based on cavity ring-down method was designed. The data of cavity ring-down curve were divided into five sections by piecewise exponential fitting, the R^2 (R-square) and root-mean-square error (RMSE) values corresponding to the index fitting results of each section were compared and analyzed, and the ring-down time of each index fitting was calculated. The experimental results show that the results obtained from 40%~60% of the cavity ring-down curve data are closest to the real value, and the reflectivity of the corresponding cavity mirror is 99.988 977%. Finally, by comparing with the reflectance of the cavity mirror, it is shown that this data fitting method can effectively measure the reflectivity of the cavity mirror and reduce the error caused by the experimental data.

Key words: cavity ring-down technology; first order exponential function fitting; R^2 ; root mean square error

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-04-28

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2020C03095); 技术基础科研项目 (JSJL2020208A003); 测试仪器项目 (2006ZCGG0103-2)

作者简介: 张金玉 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学计量测试研究工作。E-mail: 1731135828@qq.com

引言

腔衰荡技术是一种基于低损耗无源谐振腔的高精度光学检测技术,自1977年^[1]提出以来,已应用于高反射率(反射率 $R>99.5\%$)测量^[2]、痕量气体浓度检测^[3]及光纤传感^[4]等领域,是目前在上述应用领域中测量精度最高的一种测量方法^[5-7]。高反射率反射镜在引力波观测、激光陀螺、高灵敏激光光谱、高功率激光器和激光系统中也有着非常重要的作用^[8-9]。随着高反射膜镀制技术的发展和高反镜的广泛应用,精确测量高反镜的反射率显得特别重要。光腔衰荡技术测量的基本原理是向无源谐振腔(也称初始腔)内注入一束激光能量,用探测器监视腔内光强的损耗过程。一般采用直腔和折叠腔相结合的方法。结合原理公式,通过计算可得腔镜和待测光学元件的反射率。关于光学元件超高反射率测量的研究,通过调查文献可知,目前国内无论在实验研究^[10-18],还是在为实现高精度测量的理论建模分析上^[19-21],均取得了很大的进步,在国内多所院校的协同努力下,光腔衰荡超高反射率技术也得到了很大的发展。

光腔衰荡技术是目前唯一能够精确测量超高反射率(反射率 $R>99.9\%$)的方法。利用光腔衰荡技术可以测量激光光源在衰荡腔输出的指数衰减信号,从而得到衰荡时间进而得到腔镜反射率。由于腔内光强衰减不随脉冲强度的涨落而发生改变,所以测量结果与脉冲光强波动无关,测量精度高。本文通过分析实验测得的光腔衰荡法中激光衰荡信号强度与时间的关系,对测得的数据进行一次指数函数拟合,通过与光腔衰荡公式进行对比计算求出衰荡时间,进而求出腔镜的反射率。分析多组光强与时间的函数关系以及对比拟合过程中对应的 R-square 和 RMSE 值进行对比分析,统计分析出最接近腔镜的反射率值。通过这种方式即可得到测量更为准确的那种实验方法。为提升光腔衰荡法测量光学元件反射率提供了技术支撑。

1 测量原理

光腔衰荡法(cavity ring down, CRD)整个测试系统的实验装置如图1所示,由激光光源、耦合光路、光学谐振腔、光电探测器和数据采集处理系统组成。如果采用CRD测量非可见波长腔镜的反射率,为了精确调节腔镜,一般引入可见激光(如633 nm He-Ne 激光)作为准直光。在未插入被测元件前的

光学谐振腔称为初始光腔,插入被测元件后的光学谐振腔称为测试光腔,如图2所示。

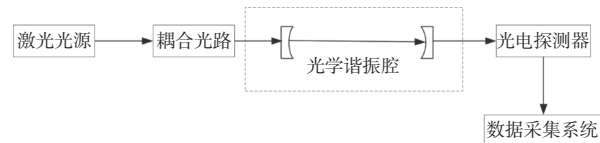


图1 初始光腔测量系统框图

Fig. 1 Block diagram of initial optical cavity measurement system

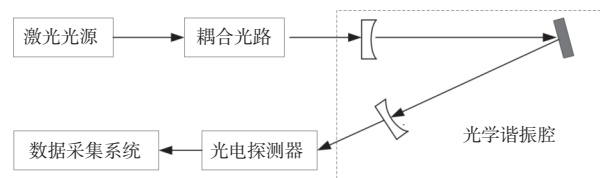


图2 测试光腔测量系统框图

Fig. 2 Block diagram of test optical cavity measurement system

在实验中,当激光器向衰荡腔注入一束脉冲激光,光在衰荡腔内不断地来回反射,若光源波长与衰荡腔满足纵模匹配,则在衰荡腔内会产生谐振,衰荡腔透射光强遵循单指数函数衰减规律。

实验过程中,脉冲激光器发出激光脉冲信号,模式匹配系统由2个透镜组成,用于将激光光束汇聚到谐振腔的焦点处,光学谐振腔由2个凹面镜构成谐振腔。具体过程为激光脉冲进入衰荡腔后,光腔输出信号可表示为

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

式中: τ 为衰荡时间(透射光强 I_0 衰减到 I_0/e 所需的时间),可表示为

$$\tau = \frac{nL}{c(\alpha L - \ln R)} \quad (2)$$

式中: c 为光速; L 为腔长; R 为光学元件的反射率; n 为腔内介质的折射率; α 为腔内吸收系数。当腔内介质为空气时,折射率 n 近似为1。若腔内无吸收介质, $\alpha=0$,初始腔和折射测试腔的反射率为 R_1 、 R_2 ,则可以根据衰荡时间计算得到腔镜平均反射率 R ,即:

$$R = \sqrt{R_1 + R_2} = 1 - \frac{L}{c\tau} \quad (3)$$

实验中,首先用图1所示的装置测量直腔衰荡信号。当入射激光与衰荡腔模式匹配,且激光脉冲较短时,衰荡信号呈单指数衰减,测得的衰荡信号按单指数衰减函数拟合,即可得到衰荡时间。

为了测量待测平面镜的反射率, 通常在图1的直腔中插入待测镜, 构成折叠腔, 如图3所示。

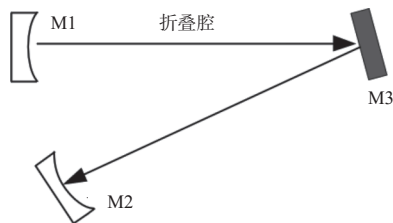


图3 折叠腔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of folding cavity

分别测量直腔和折叠腔信号并拟合得到相应的衰荡时间 τ_1 、 τ_2 , 可计算得到初始腔和折射测试腔的反射率 R_1 、 R_2 , 计算可得到待测镜的反射率 R_3 为

$$R_3 = \exp\left(\frac{L}{c\tau_1} - \frac{L}{c\tau_2}\right) \quad (4)$$

根据上述脉冲光腔衰荡技术测量反射率的原理, 将测光学元件反射率的问题转化为通过测光强以及衰荡时间 τ 的问题去进行测量和计算。由公式(4)可知, 样片反射率测量结果取决于衰荡时间常数, 不受光源光强漂移的影响, 同时具有极高的测量精度。

2 测试结果与实验分析

搭建了一套用于测量光学元件高反射率的光腔衰荡系统, 其组成示意图如图4所示。实验系统采用中心波长为633 nm的连续激光器作为激光光源, 激光经过2个凸面镜组成的模式匹配系统进入衰荡腔, 使其产生衰荡信号, 衰荡腔由M1、M2、M3组成, 其中M1和M2为曲率半径为1 m的平凹镜, M3为平面反射镜。衰荡腔的输出信号经过会聚透镜聚焦被光电探测器采集到, 探测器的输出信号经过数据采集卡采集后在电脑中进行处理。通过处理对应的光强与时间的关系得到衰荡曲线, 拟合可得到光强随时间的变化, 经计算就可得到对应的衰荡时间和腔镜的反射率。

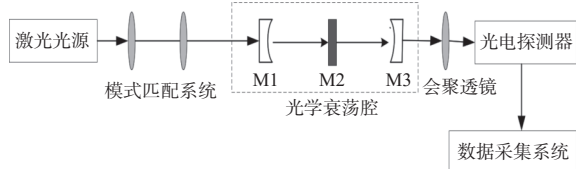


图4 实验装置系统连接示意图

Fig. 4 System connection diagram of experimental device

探测器每0.05 μs 采集一次激光强度信号, 采集的信号数据由数据采集卡进行存储。在实验过程中, 衰荡信号不可避免地会受到系统噪声的影响而产生偏差。在已知腔镜反射率情况下, 对测得的实验数据进行计算分析, 将计算得到的腔镜反射率与已知腔镜反射率进行对比, 通过比较就能很清楚地得到最接近光学元件反射率的测试方式与方法。首先将脉冲激光沿光轴耦合进入初始光腔, 调节腔镜方位和俯仰, 使其在腔内形成振荡。根据探测器输出的信号, 精确调节谐振腔, 使得输出的信号能形成稳定的指数衰荡波形, 此时其对数曲线为一条直线。在相同条件下对测试腔进行30次实验, 采集初始光腔的衰荡信号, 并记录数据, 测量初始光腔的长度 L , 并记录, 对其中的实验数据随机选择6组数据进行分析, 选取第3、8、13、18、23、28这6组实验进行处理。对处理数据进行一次指数函数拟合, 通过对测得的数据进行拟合, 得到6组实验的函数拟合表达式, 并且得到对应函数关系式的统计值 R^2 和RMSE值, 统计结果如表1所示, 其中 R^2 值越接近于1, 则表明实验数据与拟合函数之间的吻合程度越高; R^2 值越接近于0, 则表明实验数据与拟合函数之间吻合程度越低。RMSE为均方根误差, 是用来衡量测得的数据值同真值之间偏差的统计量, 值越小说明实验值与真值的偏差越小。通过统计6组实验的值 R^2 和RMSE值, 则可推断出实验装置较为稳定。

表1 6组实验数据的处理值

Table 1 Processing values of six groups of experimental data

试验组数	第3组	第8组	第13组	第18组	第23组	第28组
R^2	0.994 6	0.994 3	0.994 2	0.994 1	0.994 3	0.994 3
RMSE	4.922	4.952	4.913	4.950	4.820	4.851

如图5与图6所示, 分别为随机抽查数据第23组的一次指数函数以及二次指数函数拟合图。

拟合得到对应的一次指数与二次指数拟合的 R^2 和RMSE值。具体拟合统计值如表2所示。结合拟合得到的拟合数据值和曲线图可以看出一次指数拟合与二次指数拟合差别不大, 这表明通过处理分析一次指数函数拟合图形以及相关的统计值, 就能满足算法的处理要求。

对采集的时间与光照强度的数据进行数据拟合, 未插入被测元件前的光学谐振腔称为初始光

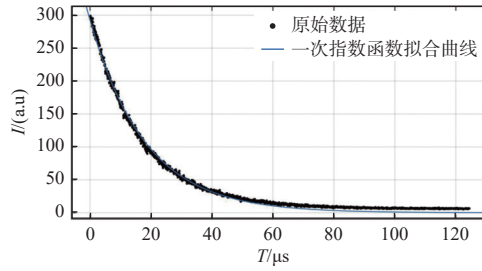


图5 第23组一次指数函数拟合曲线图

Fig. 5 Fitting curve of primary exponential function of group 23

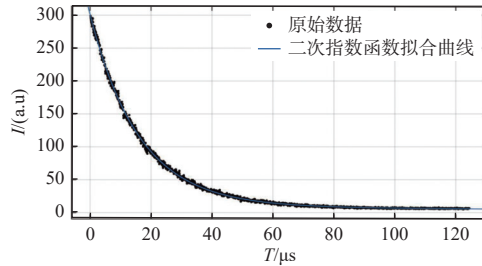


图6 第23组二次指数函数拟合曲线图

Fig. 6 Fitting curve of quadratic exponential function of group 23

表2 第23组指数函数拟合统计值

Table 2 Fitting statistics of exponential function of group 23

拟合函数次数	一次指数拟合	二次指数拟合
R^2	0.994 3	0.999 0
RMSE	4.820	1.999

腔;插入被测元件后的光学谐振腔称为测试光腔。按照原理将各仪器安装完毕,未插入被测元件的初始光腔通过实验得到几组数据,对得到的数据进行一次指数函数拟合、二次指数函数拟合以及多项式拟合,对求得的拟合参数的数值进行对比分析,重复实验发现,数据参数值差值波动很小,表明该实验装置比较稳定。每次实验采集的光照强度与时间的对应数据有2 500组,将数据分为5组,每组实验数据包含500个数据对,将这500个数据对分别通过一次指数函数进行拟合,求出对应参数的值。对比分析这5组数据值,通过对拟合得到的数据进行对比分析,可知这5组数据中 R^2 的值在逐渐变小,说明拟合直线与原始数据的拟合程度在降低,从第3组(1 001~1 500)开始下降非常明显。如图7为第1组(1~500)数据的拟合曲线图,可以看出原始数据点与一次指数拟合曲线非常吻合。如图8~图11所示,为其他各组数据的拟合曲线图。

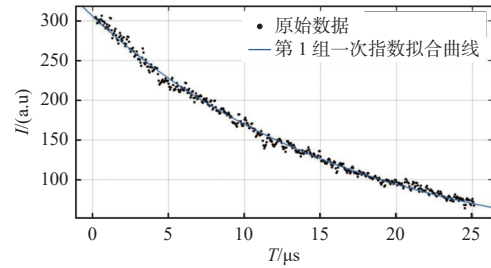


图7 第1组数据拟合曲线图

Fig. 7 Fitting curve of data of group 1

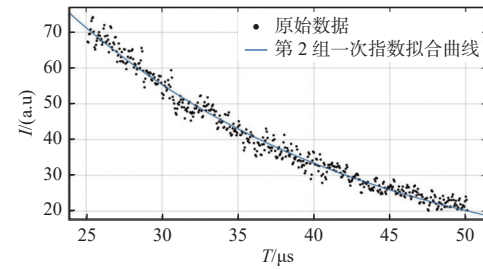


图8 第2组数据拟合曲线图

Fig. 8 Fitting curve of data of group 2

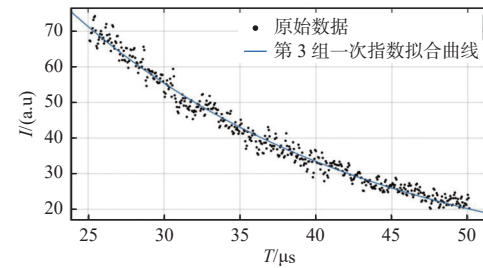


图9 第3组数据拟合曲线图

Fig. 9 Fitting curve of data of group 3

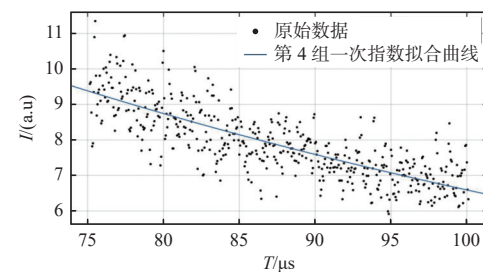


图10 第4组数据拟合曲线图

Fig. 10 Fitting curve of data of group 4

通过上面拟合曲线图可知,第4组(1 501~2 000)第5组(2 001~2 500)这2组拟合曲线与原始数据偏差较大,再结合求得 τ 与 R 值进行比较,如表3所示,已知凹面反射率为99.990%,可以得到第3组测试数据拟合求得的值最接近凹面镜的真实值,并通过看拟合曲线与数据点的拟合曲线图,

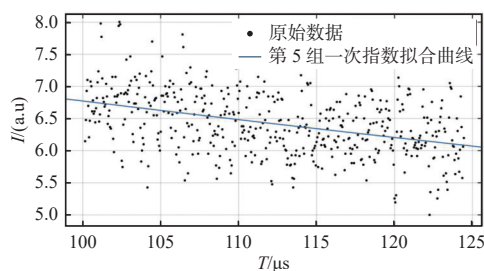


图 11 第 5 组数据拟合曲线图

Fig. 11 Fitting curve of data of group 5

可以看到前 3 组拟合比较接近, 所拟合的曲线方程更接近真实值。另外对比分析拟合曲线对应的 R^2 和 RMSE 值, 可以知道对应 R^2 值 > 0.9 , 函数拟合结

果很接近真实值, 且值已经比较小, 表明了实验的观测值与真值之间的偏差也比较小。通过对实验数据拟合能得到较为一致的结果, 说明进行衰荡腔调试的实验中, 采集得到的 40% 数据值处理拟合的结果与真实值偏差较大, 经分析可能是实验部分的数据噪声更大, 导致拟合数据偏差也较大。又通过比较拟合曲线对应的 R^2 和 RMSE 值, 根据拟合得到的计算结果与凹面镜的反射率进行比较发现, 每组测试数据的 40%~60% 部分拟合曲线更接近真实值。求得的结果也更接近真实值。这样的处理方法就能避免一些噪声干扰, 求得的值也更准确。

表 3 5 段数据求得的参数值

Table 3 Parameter values obtained from five segments of data

数据	1~500	501~1 000	1 001~1 500	1 501~2 000	2 001~2 500
τ	16.949 15	19.801 98	30.238 887	70.821 53	228.519 56
R	0.999 803	0.999 831 7	0.999 889 77	0.999 952 9	0.999 985 4
R^2	0.994 8	0.980 9	0.906 8	0.633 1	0.164 5
RMSE	4.812	2.021	1.059	0.609 2	0.444 6

3 结论

本文提出了一种分析光腔衰荡时间与光照强度的分析方法, 将测试腔数据分为数量大致相同的 5 段数据进行截取, 通过分析一次指数拟合图像中数据点与拟合图像的关系, 可以分析出最优的拟合曲线, 根据拟合出的统计量 R^2 与 RMSE 值的比较, 并通过拟合函数的表达式, 得到衰荡时间以及衰荡腔的值。将求得的衰荡腔镜发射率值与腔镜真实反射率值进行比较, 进而分析出在一组光腔衰荡曲线中, 每组实验数据 40%~60% 部分拟合曲线更接近真实值, 计算得到该段数据测得的光学元件反射率为 99.988 977%。这样的处理方法能提高光腔衰荡法实验中时间常数测量精度, 减小实验噪声带来的误差, 为提升光腔衰荡法测量光学元件反射率提供了一些技术支撑。

参考文献:

- [1] SANDERS V. High-precision reflectivity measurement technique for low-loss laser mirrors[J]. *Applied Optics*, 1997, 16(1): 19-20.
- [2] 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.

- [3] OKEEFE 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.
- [4] MANNE J O, SUKHORCUKOV W T, TULIP T. Pulsed quantum cascade laser-based cavity ring-down spectroscopy for ammonia detection in breath[J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(36): 9230-9237.
- [5] 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): 1-11.
LI Bincheng, GONG Yuan. Review of cavity ring-down technique for high reflectivity measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 1-11.
- [6] HAYDEN J, WESTBERG J, PATRICK C B, et al. Frequency-locked cavity ring-down faraday rotation spectroscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43: 5046-5049.
- [7] 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.
CUI Hao, LI Bincheng, XIAO Shilei, et al. Simultaneous measurement of S-and P-polarization reflectivity using optical feedback cavity ring down technique[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2018, 47(2): 307-310.

- [8] 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*, 2004, 31(增刊I): 486-488.
YI Hengyu, PENG Yong, HU Xiaoyang, et al. Experimental analysis of length misalignment of ring-down cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(SI): 486-488.
- [9] 高丽峰, 熊胜强, 李斌成, 等. 用光腔衰荡技术测量镜片的反射率[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(3): 335-338.
GAO Lifeng, XIONG Shengqiang, LI Bincheng, et al. Optical cavity ring-down technique for reflectance measurement of optical lens [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(3): 335-338.
- [10] 易亨瑜, 齐予, 张凯. 超高反射率测量研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(sup): 52-58.
YI Hengyu, QI Yu, ZHANG Kai. Measurement of ultra-high reflectivity[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(sup): 52-58.
- [11] 高爱华, 王少刚, 闫丽荣. 一种高精度激光吸收率测量装置[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 303-307.
GAO Aihua, WANG Shaogang, YAN Lirong. A high precision laser absorptivity measurement device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 303-307.
- [12] LEI Wei, CHEN Haiyan. Reflectivity measurement of fiber Bragg grating by cavity ring-down spectroscopy technique[J]. *Optik*, 2018, 172: 526-530.
- [13] KIVLCIM Y, ANIL Y. Nalysis of a novel sensor interrogation technique based on fiber cavity ring-down (CRD) loop and OTDR[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 43: 57-61.
- [14] LIU X, SHU X. Design of an all-optical fractional-order differentiator with terahertz bandwidth based on a fiber Bragg grating in transmission[J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56: 6714-6719.
- [15] CHAOUI F, AGHZOUT O, ALEJOS A V, et al. Closed-form expression to optimize the fiber Bragg grating sensor apodization performance Microw[J]. *Opt. Technol. Lett.*, 2017, 59: 1947-1950.
- [16] 杨林华, 许杰, 蒋山平. 真空低温环境反射镜光谱反射率原位测量技术[J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 559-565.
YANG Linhua, XU Jie, JIANG Shanping. A high precision laser absorptivity measurement device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 559-565.
- [17] 易亨瑜. 反射率测量中腔失调衰荡波形仿真[J]. *中国激光*, 2006, 33(3): 399-404.
YI hengyu. simulation of cavity misalignment ring-down waveform in reflectivity measurement[J]. *Chinese journal of lasers*, 2006, 33(3): 399-404.
- [18] 易亨瑜, 胡晓阳, 陈门雪. 超高反射率测量系统的精密调试[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(增刊I): 258-260.
YI Hengyu, HU Xiaoyang, CHEN Menxue. Precision debugging of ultra-high reflectivity measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(SI): 258-260.
- [19] LV R Q, ZHAO Y, LIU M C. Determination of refractive index by fiber-loop cavity ring-down spectroscopy and a long-period fiber grating Instrum[J]. *Sci. Technol.*, 2016, 44: 547-557.
- [20] 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): 159-169.
WANG Jintuo, YU Jin, BAI Zeqiang, et al. Numerical method for mode selection in CWcavity ring-down spectroscopy[J]. *Journal of Physics*, 2019, 68(24): 159-169.
- [21] 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): 222-226.
DU Xinghu, XUE Ying, HE Xing, et al. High reflectance measurement based on coupled cavity ring-down technique[J]. *Chinese Laser*, 2020, 47(6): 222-226.