

双光路自相关系统透反射率的重复精度测试

张春香 杨琳* 惠宏超 郭亚晶 唐顺兴 缪洁 朱宝强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 设计了一台双光路自相关的透反射率测量系统, 实验测试了 3 种不同形态激光作光源时, 系统的单点透反射率重复性精度, 验证了光源的功率和偏振稳定性对此系统的影响较小。在验证性分析的基础上完善了系统的稳定性, 并对系统精度进行校准。实验结果显示, 在置信度为 95% 时, 系统的重复不确定性能稳定在 0.04% 左右, 满足大口径低透射率、低反射率光学元件均匀性测量的精度要求, 为此类仪器设计提供了参数选择依据。

关键词 测量; 锁相放大; 光电探测器; 系统重复性; 随机噪声

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0908008

Repeatability of Transmittance and Reflectance Measurement of Two Path and Correlation System

Zhang Chunxiang Yang Lin Hui Hongchao Guo Yajing
Tang Shunxing Miao Jie Zhu Baoqiang

(Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A two path and self-correlation system is designed to measure reflectance and transmittance. In order to verify and modify the stability of this system, repeatability of reflectance and transmittance for single-point is tested and analyzed by using of three different laser sources, and it concludes that the power and polarization stability of the system does little reaction with system repeatability. Stability is enhanced based on experimental analysis, what's more, system accuracy is calibrated. The result turns out that the uncertainty is stabilized at 0.04%, which fits well with the accuracy requirement of uniformity measurement on large-aperture optics with low transmittance or reflectance, and concrete parameter selections are provided to the instrument design of this kind.

Key words measurement; lock-in amplifier; optoelectronic detector; system repeatability; random noise

OCIS codes 120.5700; 120.1680; 120.7000; 120.1880; 120.5240

1 引 言

随着科技的进步, 惯性约束聚变(ICF)驱动装置正向大口径、高功率密度的趋势发展, 大口径光学元件的光通量已经用到几近极限。提高光束近场分布均匀性是增大激光运行通量的最佳途径, 好的近场分布需要有很高的膜层检测与控制技术。在高功率激光装置中, 用大口径光学元件(360 mm×

360 mm 左右)对主光束取样以监测主光束(1053 nm)的质量, 取样率一般只有 0.1%~0.7%, 鉴于此, 镀膜光学元件膜层的透射率、反射率及其均匀性直接影响到激光的光束质量及取样精度^[1]。因此, 大口径光学元件的加工质量监测和离线检测, 作为 ICF 系统安全、高效运行的最终保证, 需要一套装置对大口径光学元件薄膜均匀性进行高精度

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-06-12

基金项目: 国家 863 计划(2007SQ804)资助课题。

作者简介: 张春香(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电检测、激光参数测量等方面的研究。

E-mail: purezeal@163.com

导师简介: 朱宝强(1966—), 男, 硕士生导师, 研究员, 主要从事高功率激光系统中非线性光学和光束质量测控等方面的研究。E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: axiulowt@hotmail.com

检测。

对于薄膜性能和光学元件的透射率和反射率的测量,目前主要采用商用分光光度计,典型的有日本的日立公司和岛津公司,美国的 CARY, P-E 公司等,用于测量透射率的光度精度为 $\pm 0.05\%T$,但反射率测量通常要加上一个特殊的昂贵附件,即使如此,其精度仍偏低,约为 $0.2\% \sim 0.5\%$ ^[2]。这种分光光度计有很多局限,首先它只能测量小样品(口径小于100 mm),而且它不能测量入射角在 6° 以内的反射率,最后,由于其测量光斑较大,样品室很小,难以扫描而实现均匀性测量,光谱带宽为1.8 nm左右,不能满足神光 II ICF 装置中单波长、小角度(6° 以内)取样镜的透反射率均匀性检测的需求。

国外,加拿大国家研究院(NRCC)设计了高精度紫外-可见-红外分光光度计,在紫外和可见波段测量的一致性优于 0.05% ,但是在红外波段,如测量高功率激光基频波长1053 nm,低透射率光学元件(小于1%),相对标准差下降为 0.2% ,重要原因是此条件下重复不确定度劣化为 0.25% ,延长所采集信号的积分周期对结果优化作用有限^[3]。美国国家点火装置(NIF)搭建了大口径均匀性分布的光谱检测系统,检测精度为 0.1% 。国内,浙江大学信息学院实验室搭建了一个均匀性测量装置,测试的重复精度优于 0.5% ^[2]。但是,在红外1053 nm波长处,大口径低透或低反元件透反射率均匀性的检测精度受单点重复性制约,还满足不了要求。

系统的重复精度包括单点测量的重复精度、可重复操作精度等,直接影响着系统测量的测量精度,是实现高精度均匀性测量的基础,需要对其进行研究,分析影响它的主要因素并提出相应的解决方案。根据高功率激光系统对透反射率测量的需求,要求系统工作波长在1053 nm,口径在450 mm,空间分辨率最高为1 mm,反射率测量单点重复精度为 0.05% ,透射率单点重复精度为 0.01% 。为了提高均匀性测量的精度,本文设计一种双光路自相关系统,针对单点的重复性测量进行测试分析,分析主要误差因素,完成1053 nm波长的3类光源:光纤激光器[掺铒光纤放大器(EDFA), $0 \sim 1$ W可调]、Nd:YLF 固体激光器($0 \sim 600$ mW可调)、半导体激光器的单点重复性测试。提高3种光源所在的系统中单点重复性,以期达到稳定状态。并且,完成系统测量绝对精度的校准,为后续大口径元件的均匀性扫描检测作验证性研究分析,也为光束质量检测及后续激光补偿系统提供科学依据。

2 双光路、自相关实验系统原理设计

2.1 相关检测技术

相关检测是利用信号周期性和噪声随机性的特点来进行锁相检测的。锁相放大器中采用的是相关接收技术,能有效地提高信噪比。在光电检测系统中,测量结果通常会受到背景光、暗电流、前置放大器漂移、环境干扰噪声等影响。由背景光引起的误差信号通常为缓变的准直流信号或随机信号,由光电探测器暗电流和放大电路零漂引起的亦为直流的误差信号,而由环境干扰引起的噪声一般是某个频段噪声或者随机噪声。因此消除这类误差因素的有效方法是将光源光功率调制成某一固定频率的脉冲光,且调制频率远离环境中可能存在的干扰,如工频及其谐波、电脑手机频率等。这样,在后续电路中锁相放大器的参考频率和斩波器的频率相同,即可滤除上述干扰信号,经过检波、低通滤波后即可将调制载波信号恢复成与待测量信号成正比的输出。

2.2 双光路检测的原理

为了减少光源或光路引起的功率不稳定性的影响,采用双光路差动的方法如图1(a)所示,由分束器2将光束分成两束,反射光为参考光,透射光为测量光^[4]。分束器2后放置衰减片,在一定时间内重复测量计算测量光与参考光的比值随时间的重复性,多次采样,求平均值及总样本的标准偏差。

对准确度的校准可以对已知特性参数的样品测量或者用其他技术或仪器测量的结果进行比较。但大口径光学元件的标准样品难以得到,所以,采用与其他仪器的结果进行比较的方法,以及与已知特性参数的样板 Fresnel 计算值比较的方法。

2.3 透反射率的校准及精确度测量

图1(b)为测量系统的绝对精度,先进行系统的定标。

透射率 T (或者反射率 R) 的计算公式为^[5]

$$T_{\text{Sample}} = K_{\text{Cal}} \times \frac{P_{\text{SIG,OPT}} - P_{\text{SIG,OFF}}}{P_{\text{REF,OPT}} - P_{\text{REF,OFF}}}, \quad (1)$$

式中 $P_{\text{SIG,OPT}}$ 为测量光电二极管 PD2 的信号, $P_{\text{REF,OPT}}$ 为参考光电二极管 PD1 的信号, $P_{\text{SIG,OFF}}$ 为测量光电二极管 PD2 的背景噪声, $P_{\text{REF,OFF}}$ 为参考光电二极管 PD1 的背景噪声, K_{Cal} 为校准系数。

T (或 R) 的校准可以由高精度分光光度计精确测得正入射的透射率^[6],得到标准值 T_{Standard} ,再将样品放入光路[见图1(b)]中测出正入射时的校准参数 $P_{\text{REF,CAL}}, P_{\text{SIG,CAL}}, P_{\text{REF,OFF}}, P_{\text{SIG,OFF}}$,从而得到 K_{Cal} 为

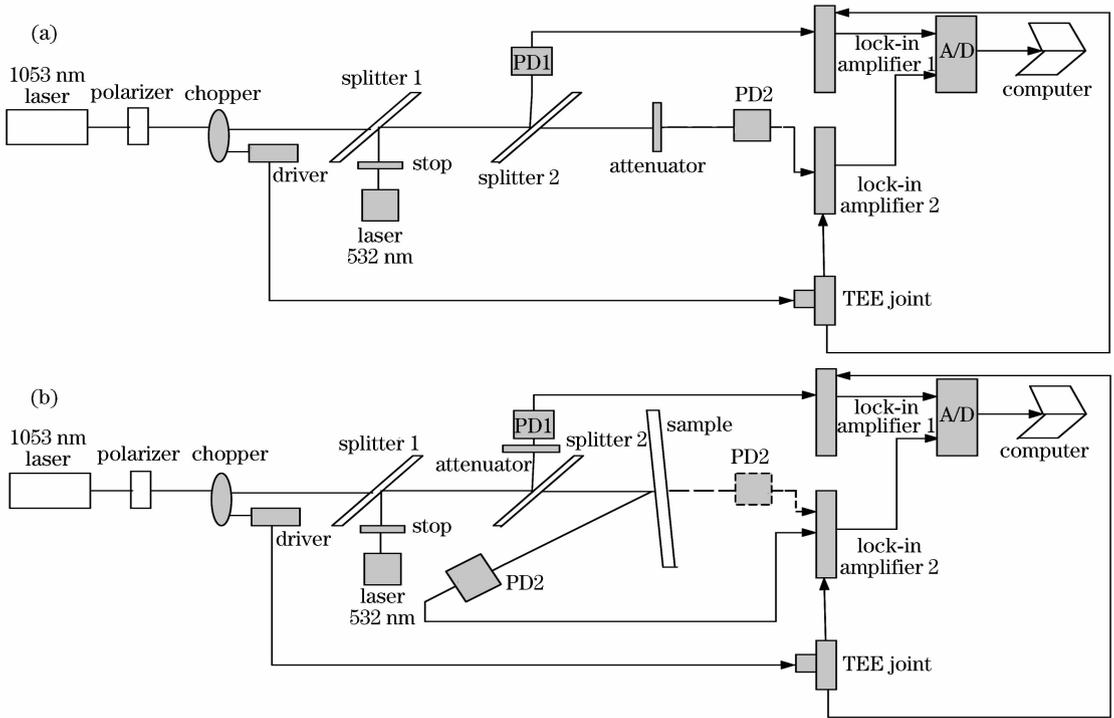


图1 实验原理装置示意图。(a) 系统单点重复精度测量；(b) 实验绝对精度测量及校准

Fig. 1 Experimental theoretic configure figure

(a) System single-point reproducibility measurement; (b) system accuracy measurement and calibration

$$K_{\text{Cal}} = T_{\text{Standard}} \times \frac{P_{\text{REF,CAL}} - P_{\text{REF,OFF}}}{P_{\text{SIG,CAL}} - P_{\text{SIG,OFF}}}. \quad (2)$$

对于 T (或 R) 接近 100% 的情况: $T_{\text{Standard}} = 1$,

$$K_{\text{Cal}} = \frac{P_{\text{REF,CAL}} - P_{\text{REF,OFF}}}{P_{\text{SIG,CAL}} - P_{\text{SIG,OFF}}}.$$

对于 T 或 R 接近 4% 的情况: 测量未镀膜 K9 玻璃板小角度 θ 入射时的反射率 ($\theta < 5^\circ$), 放入光路中测出校准参数, 再由 Fresnel 反射率计算值得到 R_{Standard} , 即 $R_{\text{Standard}} = T_{\text{Standard}}$, 由 (2) 式计算出 K_{Cal} , 从而进行校准。有了校准系数后, 即可测量透射率和反射率。

3 实验研究

3.1 系统单点重复精度的测量分析

图 1(a) 是单点重复性测量的系统示意图, 分为 3 个部分: 光路部分、光电转换及锁相放大、信号采集和处理。考虑到高功率激光系统工程应用背景中光源是 1053 nm 的 p 偏振光, 图 1(a) 系统中, 将 532 nm 激光器的可见光耦合进光路, 便于光路调节和准直。主光路部分由 1053 nm 波长激光光源经过一个格兰泰勒棱镜起偏器起偏成 p 光, 再经 SR540 光学斩波器调制到一定频率, 由分束器 2 反射出参考光, 监测光路功率抖动, 形成差动。参考光和测量

光经一定的衰减片后, 分别由 2 个同一型号可调增益的 Si 光电二极管 PD1, PD2 探测输出电压信号, 经锁相放大器 SR830 解调信号, 低通滤波、放大后输出模拟信号, 再输入 16 位数据采集卡 USB7335B, 由计算机进行软件计算处理。

Si 光电探测器 PD1, PD2 采用 Thorlabs 公司的 PDA100A (口径为 $\phi 10$ mm), 0~70 dB 增益可调。按照图 1(a) 所示搭建光路, 由 USB7335B 采集两路光的信号, 处理计算其比值平均值和标准偏差。为了验证此系统的单点重复精度, 实验先后选用 1053 nm 波长的 3 种不同类型激光器作光源, 对装置的单点重复不确定度进行测试, 并分析各类影响因素。电路部分噪声和干扰影响较大, 着重减少或排除。电信号放大采集部分的电源接稳压源; 鉴于实验室的地不够干净, 将锁相放大器接浮地; 斩波器的驱动电源和信号电源 (USB7335B, PDA100A, SR830 电源等) 分开; 合理选择光电二极管的增益, 即反馈电阻, 以改善信噪比^[6]。

重复精度软件部分包括: 每 0.5 s 测一次, 单次读入 100 个数据, 连续采集 100 次实验数据, 用 Matlab 求两路光比值的均方根值 (RMS) 及标准偏差 σ ^[7]。2 个光电探测器是同一型号的, 探测电路的信噪比、动态区间不一定相同, 为了验证其对结果的

影响,实验中,把2个探测电路分别在参考光路和测试光路中交叉重复测试,测试数据如图2所示,两种情况下,比值互为倒数,且重复性也较好,不确定度为0.071%左右,图2(a),(b)是选取重复测试中的一组数据,分别为探测电路交换前后的结果,说明2个探测电路具有一致性。

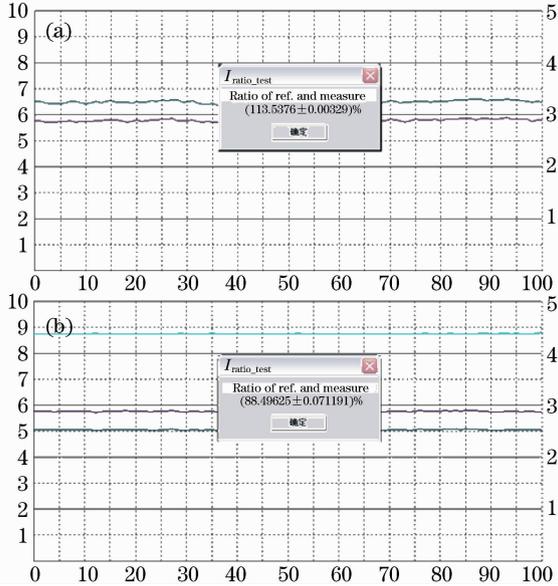


图2 两探测电路一致性测试

(a) 探测电路交换前;(b) 探测电路交换后

Fig. 2 Uniformity test of two detect circuits

(a) Before exchange; (b) after exchange

由理论分析可知,设计的双光路系统中,光源的功率和偏振的稳定性对系统重复精度影响较小。为了验证系统的这一特性,选用3种不同形态、不同特性的光源对系统进行测试。先选用Nd:YLF固体激光器,0~600 mW可调,测量光路 $T=3.7\%$ 的衰减,2个PDA100A均调到10 dB增益,斩波器的调制频率为216.9 Hz,单点重复不确定度计算如图3(a)所示,标准偏差为0.00043。EDFA光纤激光器(0~1 W可调)输入,经过 $\phi=0.5$ mm的光纤准直器作为光源,输入功率为506 mW,起偏器后功率为5 mW,不加衰减片,调制频率为198.2 Hz,结果如图3(b)所示,标准偏差为0.000833。半导体激光器出射光耦合到光纤,再经过光纤准直镜、起偏器后的功率为0.35 mW,结果如图3(c)所示,标准偏差为0.000126。

在此双光路、自相关设计方案下,Nd:YLF固体激光器重复不确定性优于0.09%,半导体激光器的不确定性为0.03%~0.04%,而光纤激光器的不确定性为0.03%~0.08%。因此采用双光路自相关系统作为实验方案,放宽了对光源稳定性的要求,反

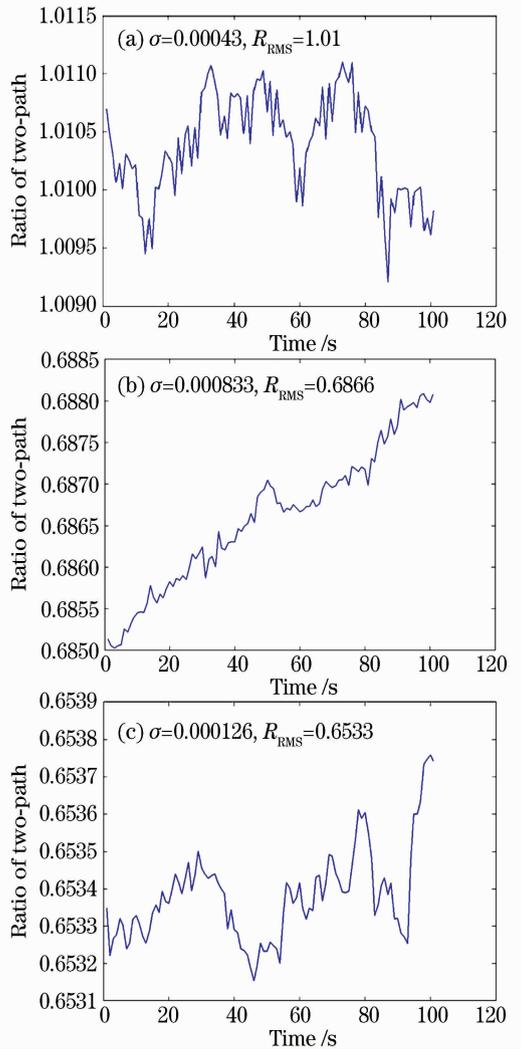


图3 双光路自相关系统单点重复不确定度。(a) 固体激光器Nd:YLF作光源;(b) 光纤激光器作光源;(c) 半导体激光器作光源

Fig. 3 Two-path self-correlation system single-point repeatability. (a) Nd:YLF laser source; (b) fiber laser source; (c) semiconductor laser source

复测试进行概率统计,置信度为95%时,系统单点重复精度稳定在0.04%。但是实验中发现,探测光功率较高时,重复不确定性偶尔会增大至0.1%,经固定因素法验证分析得出,主要影响因素是Si光电二极管PDA100A的输出稳定性受温度引起热噪声的制约,1053 nm波长下,Si探测器的温度不确定为0.6%/°C^[8]。给Si光电二极管设计一个热电式的TEC温控电路,将有利于进一步提高输出稳定性^[9~11]。根据初步测试出的PDA100A的线性区间,为充分利用光电二极管的动态范围,可选用0~300 mW以上功率可调的光纤激光器或固体激光器作光源,需要较大的动态范围时配合使用光学衰减片。

3.2 系统反射率重复性测试及校准

反射率的定标是测量不同角度入射时的反射率,与对应角度下 Fresnel 计算值比较。本项目的工程背景是透射率或反射率接近 3%,所以不失一般性,实验测试未镀膜的 K9 玻璃样板小角度入射下的反射率,并进行校准^[12]。所用 K9 玻璃板楔角为 3°,口径为 $\phi 100$ mm,中心厚度为 19 mm。

因为 K9 玻璃小角度反射率为 4%左右,所以测量光路有近 30:1 的动态范围,对探测器动态范围要求较高。按照图 1(b)搭建出小角度反射率实验装置如图 4 所示(彩图请见网络电子版),在参考光路中加入衰减片,总衰减为透射 $T = 13.8\%$,测量光路不加衰减。先让光束垂直标准样品 K9 玻璃入射,再旋转一个小角度便于探测反射光,经计算入射角为 2.0045° 。EDFA 光纤激光器调到 59.3 mW,先挡住光源,采集计算光电二极管背景噪声 $P_{\text{SIG,OFF}}$, $P_{\text{REF,OFF}}$,再采集计算反射光功率、参考光功率 $P_{\text{SIG,CAL}}$, $P_{\text{REF,CAL}}$,计算比值 $\frac{P_{\text{SIG,CAL}} - P_{\text{SIG,OFF}}}{P_{\text{REF,CAL}} - P_{\text{REF,OFF}}}$ ^[13]。

为了测试反射率随时间的重复不确定度,保持 K9 玻璃板不动,20 min 内,每 0.5 s 采集数据一次,比值的平均值为 24.188%,标准偏差为 0.0172%。

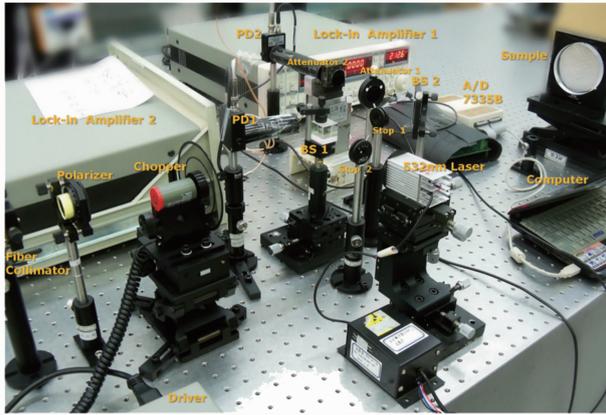


图 4 双光路自相关系统实物图

Fig. 4 Two path and autocorrelation system physical photograph

进行校准,由 Fresnel 公式计算反射率得 $\theta = 2.0045^\circ$,由 $\sin \theta = n \times \sin \theta'$,其中折射率 $n(1053 \text{ nm}) = 1.506340$,得到折射角 $\theta' = 1.3310^\circ$,从而计算反射率^[14]

$$R_{1053,p} = \left[\frac{\tan(\theta - \theta')}{\tan(\theta + \theta')} \right]^2 = 4.083\%, \quad (3)$$

代入(2)式,得

$$K_{\text{Cal}} = R_{1053,p} \times \frac{P_{\text{REF,CAL}} - P_{\text{REF,OFF}}}{P_{\text{SIG,CAL}} - P_{\text{SIG,OFF}}} =$$

$$\frac{4.083\%}{24.188\%} = 0.169. \quad (4)$$

在此基础上,测试反射率随位置变化的重复不确定性,在 2 h 内,每隔一段时间,将 K9 玻璃板沿其前表面从中心位置沿水平直径方向平移,间隔为 3 mm,测量 6 组数据,每组数据都是连续采集 100 个数据求平均,经(4)式校准,并统计计算,结果如表 1 所示。

表 1 反射率随位置变化的重复性测量
Table 1 Reproducibility of reflectance with plate translation

Position	Reflectance (after calibration) /%
1	4.010
2	4.020
3	4.035
4	4.036
5	4.065
6	4.063
RMS	4.038
Standard error σ	0.021

从表 1 得出,标准偏差只有 0.021%,由测量出的随位置变化的数据可看出,数据只在第 3 位变化,可知反射率在千分位不变,万分位有效,能准确反映出反射信号在万分位的变化和差异。而对于低反射率元件(小于 1%)的情况,双光路求两路光比值的优势,使得在膜层只有小量的取样率(0.05%~0.10%)时,通过提高光源的功率,在参考光路中加入高精度的衰减片,从而保证在 0.05% 取样时,输入光仍然在两个探测器的线性区间,与 4% 取样时使用的动态区间一致,重复精度能保持在相同的量级之内。关于这一点,课题组后续会进行透反射率小于 0.1% 的光学元件的均匀性测量实验,进一步研究论证。

4 结 论

设计了一台双光路自相关的样机方案,验证分析了 1053 nm 波长的不同类型激光器作光源时,系统透射率和反射率的单点重复精度,并进行校准。实验结果显示,此系统方案的重复不确定性比较理想,对于低透、低反的取样镜也能稳定在 0.04% 左右(95% 的置信度),基本能满足大口径低透射率、低反射率光学元件均匀性测量的精度要求,并为此类系统设计的参数选型做了具体的验证分析。但是,要使其达到更稳定可靠的状态,系统的电子干扰有待进一步抑制,需给光电二极管设计一个热电式的

TEC 温控电路,并准确标定系统的线性区间,且锁相放大器良好接地,以充分发挥其弱信号提取放大的能力。

参 考 文 献

- 1 D. R. Gibson, P. H. Lissberger. Optical properties of narrowband spectral filter coating related to layer structure and preparation [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **22**(2): 269~281
- 2 Liu Jun. Research on the Measurement System of Reflectance and Transmittance of Large-Aperture Optical Components [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005. 1~10
刘 骏. 大口径光学元件透反射率测量系统的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005. 1~10
- 3 Joanne C. Zwinkels, Denis S. Gignac. Design and testing of a new high-accuracy ultraviolet-visible-near-infrared spectrophotometer [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(10):1566~1567
- 4 Hu Yongming, Chen Zhe, Chang Shengli *et al.*. Transmittance and reflectance measurement configure of large aperture optics; Chinese Patent, 98231304. 7[P]. 1999-09-15
胡永明,陈 哲,常胜利 等. 大尺寸光学件透射率和反射率测量装置: 中国专利, 98231304. 7[P]. 1999-09-15
- 5 Eric Lavastre, Isabelle Lebeaux, Jean-Christophe Poncet *et al.*. Specific photometer for large coated optics [C]. *SPIE*, 2005, **5878**:58781A
- 6 Herve Piombini, Philippe Voarino. Apparatus designed for very accurate measurement of the optical reflection [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(36):8615~8618
- 7 Fei Yetai. Error Theory and Data Processing (5th) [M]. Beijing: China Machine Press, 2004
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 第五版. 北京: 机械工业出版社, 2004
- 8 Dong Wei, Yuan Zundong, Lu Xiaofeng. Research on the nonlinearity of photoelectric pyrometer based on light-emitting diode light sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8):2412~2416
董 伟,原遵东,卢小丰. 基于发光二极管光源的光电高温计非线性研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8):2412~2416
- 9 Fu Wenyu. Analysis on linearity and SNR of Si photodiodes [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(4):267~269
付文羽. 硅光电二极管的线性度及信噪比分析[J]. 半导体光电, 2003, **24**(4):267~269
- 10 Zhang Hua, Gong Yijian. Design for high precision miniature PWM temperature controller [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(2):29~31
张 华,龚义建. 一种微型高精度 PWM 温度控制器的设计[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(2):29~31
- 11 Huang Lihong, Tao Cunkan, Yang Xiaochun. A calibration method for measurements of transmittance and reflectance [J]. *Journal of Yichun University (Natural Science)*, 2007, **29**(6): 66~68
黄黎红,陶纯堪,杨晓春. 一种透反射比测试系统的非线性校准[J]. 宜春学院学报(自然科学), 2007, **29**(6):66~68
- 12 Tang Shunxing, Ji Lailin, Ouyang Xiaoping *et al.*. Improve the adjusting reliability of optimum matching angular of the frequency tripling of high power laser by laser near field CCD diagnostic device [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 262~264
唐顺兴,季来林,欧阳小平 等. 利用 CCD 近场仪提高高功率激光器三倍频最佳匹配角的调节可靠度[J]. 中国激光, 2009, **36**(s1):262~264
- 13 C. J. Stolz, M. Runkel, M. S. McBurney *et al.*. Metrology of mirrors for the national ignition facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 114~120
- 14 Yu Daoyin, Tan Hening. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 193~194
郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 1994. 193~194