

文章编号 1004-924X(2013)05-1144-07

多表面干涉下的光学元件面形检测

任 寰^{1,2}, 马 力^{1,2}, 刘 旭², 何 勇¹, 郑万国², 朱日宏^{1*}

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了消除平行平板类光学元件的多表面干涉效应对元件面形测量的影响, 提出了基于波长移相调谐技术与傅里叶变换原理的多表面干涉条纹检测技术。首先, 根据波长移相原理和被测元件的厚度, 按照推算出的被测腔长与元件厚度间的比例关系正确摆放被测元件的测试位置。然后, 通过波长移相技术采集一组干涉图。最后, 对这组多表面干涉图进行离散傅里叶变换, 提取带有被测元件前后表面面形的频率信息以及厚度变化的频率信息, 通过重构算法得到准确的面形信息和厚度信息。实验结果表明: 与传统的 13 步移相算法相比, 得到的前表面 PV 值和 RMS 值分别相差 0.003 和 0.001, 而后表面 PV 值与 RMS 值分别相差 0 和 0.001。这些结果基本满足平行平板类光学元件面形的高精度测量与洁净测量的要求。

关键词: 光学元件; 面形检测; 多表面干涉检测; 波长移相; 平行平板; 傅里叶变换

中图分类号: O436.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1144

Optical element test with multiple surface interference

REN Huan^{1,2}, MA Li^{1,2}, LIU Xu², HE Yong¹, ZHENG Wan-gu², ZHU Ri-hong^{1*}

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn

Abstract: To eliminate the effect of multi-surface interferometric effect on the profile measurement of transparent elements, an interferometric fringe measuring method was proposed based on wavelength tuning and Fourier transfer. Firstly, according to the principle of wavelength-tuned phase shifting and the thickness of the element to be measured, the element was put a proper position in the test accordance with the proportional relation between cavity length and element thickness. And then, a group of interferograms were captured by the wavelength phase-shifting technology. Finally, with disperse Fourier transform for the group of interferograms, the frequency information for the front surface, back surface and thickness variation of the measured element was extracted and the accurate surface information and thickness information were obtained through a reconstruction algorithm. Experimental results indicate that the differences of PV and RMS for the front surface are 0.003 and 0.001, and those for the back surface are 0 and 0.001 respectively as compared with the traditional 13-step phase-shifting interferometry. These results satisfy the system requirements of the high precision test and

收稿日期: 2012-12-10; 修订日期: 2012-12-29.

基金项目: 国防科技工业局重点技术基础资助项目 (No. B112011A001)

the lustration test of the elements.

Key words: optical element; surface test; multiple surface interferometry; wavelength-tuned phase shifting; parallel plate; Fourier transform

1 引 言

移相干涉技术是现代光学元件面形检测的最主要方法之一。按照移相方式的不同,该技术可分为空域移相法和时域移相法,时域移相法从实现方式上又可分为硬件移相技术和波长移相技术。其中,以压电陶瓷(PZT)完成移相为代表的硬件移相技术和干涉仪检测技术的应用最为广泛^[1-6]。在测量平行平板类光学元件时,干涉仪测量将产生多表面干涉,若用传统的硬件(如PZT)移相算法计算多表面干涉将会产生非常大的误差。现阶段在工程检测中减少误差的常用方法主要是抑制被测平行平板元件后表面的反射,如涂抹凡士林,但是该方法操作不便且不能完全去除非测量面的干涉影响^[7-9]。

针对多表面干涉问题,国内外做了大量的研究。在90年代,Peter de Groot等人提出了基于加权波长调谐相移的算法^[10-12],该方法通过设计合适的采样窗函数实现了对有用信号的提取,它能有效抑制杂散谐波的干扰,但要求波长相移是连续线性的且被测平行平板的厚度和干涉腔长度比例要满足要求;2006年,徐建程等人根据三表面干涉时每个面的反射率不同,提出了一种单幅三表面干涉条纹空域傅里叶分析法,但该方法需引入空间载波且精度较低^[13-14],在实际中使用不多。本文结合了波长移相干涉技术与傅里叶变换移相技术,提出了一种准确测量平行平板光学元件表面面形的方法^[15]。

2 基本原理

若波长移相干涉仪^[16-17]得参考镜(RF)与被测平行平板(TF)表面之间的光程差为 $L(x, y)$,则干涉信号的光强表达式为:

$$I_k(x, y) = I_0(x, y) \left\{ 1 + \gamma_0(x, y) \cos \left[\frac{4\pi L(x, y)}{\lambda_k} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: $I_0(x, y)$ 为背景光强, $\gamma_0(x, y)$ 为调制度, $\lambda_k = \lambda_0 + k\Delta\lambda$ 为第 k 次激光波长改变后的波长值。

通过公式可以看出,改变光源的波长可以实现干涉信号相位的改变。

如公式(1)所示,在多表面反射情况下,波长移相的起始干涉信号相位为:

$$\varphi_0(x, y) = \frac{4\pi L(x, y)}{\lambda_0}. \quad (2)$$

当波长发生变化时,

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \frac{4\pi L(x, y)}{\lambda_0 + k \cdot \Delta\lambda} \approx \frac{4\pi L(x, y)}{\lambda_0} - \\ &\frac{4\pi L(x, y)}{\lambda_0^2} \cdot k \cdot \Delta\lambda = \varphi_0(x, y) - 2\pi k\nu(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ν 为对应的信号频率,其表达式为:

$$\nu(x, y) = \frac{2L(x, y)}{\lambda_0^2} \Delta\lambda. \quad (4)$$

由于被测件的折射率 n 随波长变化而变化,当波长变为 $\lambda_0 + \delta\lambda$ 时, n 可以表示为:

$$n(\lambda_0 + \delta\lambda) = n_0 + \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)_0 \delta\lambda + \left(\frac{d^2n}{d\lambda^2} \right)_0 \delta\lambda^2 + \dots \quad (5)$$

式(5)的第三项(群速度色散)很小,可以忽略不计。在每个干涉信号当中,由波长变化引入的相移变化量可表示为:

$$\alpha_{p,q} = \frac{4\pi L\delta\lambda}{\lambda_0^2} \left(p + q \frac{n_0 T}{L} \left(1 - \frac{\lambda_0}{n_0} \frac{dn}{d\lambda} \right) \right). \quad (6)$$

其中: p, q 是反映双光束路径的整数; n_0 是波长为 λ_0 时的折射率; T 为被测件的厚度; $\frac{dn}{d\lambda}$ 是被测件折射率随波长的变化率。

表1为 $n_0 T/L=3$ 时各干涉信号的振幅和频率。其中, R 是测试平面的反射系数(BK7的 $R=0.04$)。

由式(6)和表1可以看出,只要合理设置测试

表1 $n_0 T/L=3$ 情况下各干涉信号的振幅和频率

Tab. 1 Amplitude and frequency of each interference signal for $n_0 T/L=3$

	相对幅值	频率比例 ν_k/ν_1	
		近似比例	BK7
ν_1	1	$1(p=1, q=0)$	1
ν_2	$R \times R \times R$	$2(2, 0)$	2
ν_3	1	$3(0, 1)$	3.04
ν_4	R	$2(-1, 1)$	2.04
ν_5	1	$4(1, 1)$	4.04

系统的几何结构,使不同表面形成的干涉条纹强度变化频率可以在频域内完全区分开来,便可根据傅里叶变换来提取相对应的频率信息,进而获得被测面的相位信息。通过理论验证,假设 $nT/L=3$, 波长为 690 nm, $\frac{\lambda_0}{n_0} \frac{dn}{d\lambda} = 1.2\%$, 对光强信号进行傅里叶变化,用频谱图来表示各个干涉信号所占的相对量,如图 1 所示。由图 1 看出,进行前表面轮廓测量时,频率噪声的影响主要是在 3 倍和 4 倍基频处,因此设计的算法要能够消除 3, 4 次频率噪声的影响^[18]。

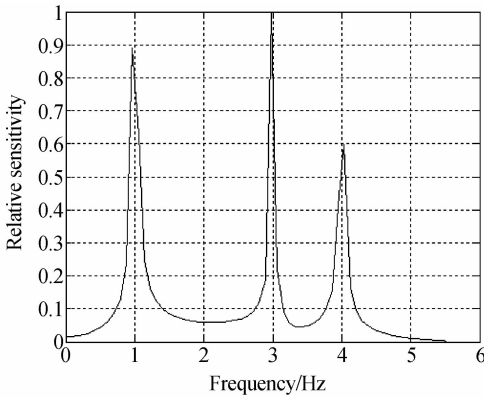


图 1 光强信号的傅里叶变化图

Fig. 1 Fourier transform of signal amplitude

若相移波长是连续线性的,对透明平行平板测量时,接收到光强信号的是多表面反射形成的多组干涉条纹的叠加。这里只考虑 3 个主要干涉条纹的叠加,即干涉仪参考面与被测平行平板前表面的干涉、参考面与被测平行平板后表面的干涉以及被测平行平板前后表面的自干涉。那么干涉场的总光强值为:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y) \{1 + \gamma_0(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2\pi v_0 t] + \gamma_1(x, y) \cos[\varphi(x, y)_1 + 2\pi 3v_0 t] + \gamma_1(x, y) \cos[\varphi(x, y)_2 + 2\pi 4v_0 t]\}. \quad (7)$$

对式(7)进行傅里叶变换有:

$$I_F(x, y, v) = I_0(x, y) \{ \delta(v) + \frac{1}{2} \gamma_0(x, y) [\delta(v - v_0) \exp(i\varphi(x, y)) + \delta(v + v_0) \exp(-i\varphi(x, y))] + \frac{1}{2} \gamma_1(x, y) [(v - 3v_0) \exp(i\varphi(x, y)_1) + \delta(v + 3v_0) \exp(-i\varphi(x, y)_1) + \delta(v - 4v_0) \exp[i\varphi(x, y)_2] + \delta(v + 4v_0) \exp[-i\varphi(x, y)_2]] \}. \quad (8)$$

如图 2 所示,某一点干涉信号对应 3 个频率成分,两两对称。找出频率信息最大的 6 个点,提取对应所需的频率信号的最大点,通过反正切求

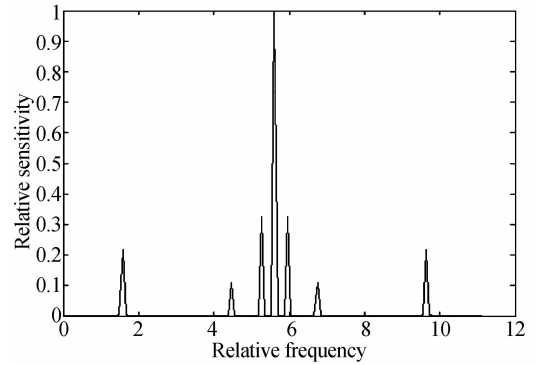


图 2 多表面反射测量得到的测量域中某一点的频率信息

Fig. 2 Frequency of one point in testing field

得该点的相位信息 $\varphi(x, y)$, 然后对干涉图上的所有点做同样处理,运用式(9)计算后得到的是被测表面的包裹相位,其相位被限定在 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, 通过相位解包后得到被测表面的实际相位信息^[19-20]。

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[I_F(x, y, v_0)_{\max}]}{\text{Re}[I_F(x, y, v_0)_{\max}]} \quad (9)$$

3 实验验证

实验中对一块口径 $\varphi 60$ mm, 厚度 40 mm 的 K9 平行平板进行了测量, CCD 直接采集到的干涉图如图 3 所示。测量中根据元件厚度和折射率,依据 $nT/L=3$ 得到测试腔长为 20 mm; 准确摆放被测元件位置,计算出元件前后表面面积及厚度的变化信息,如图 4 所示。为了对比测量结

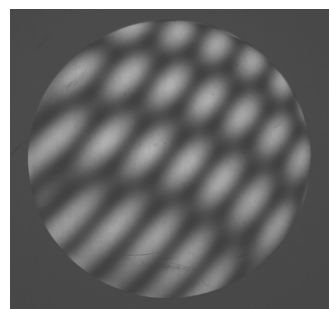


图 3 多表面干涉条纹

Fig. 3 Multi-surface interference

果,对被测元件前后表面均匀涂凡士林,在 ZYGO 干涉仪上用 13 步移相算法测量得到该元件的前后表面面形,如图 5 所示。

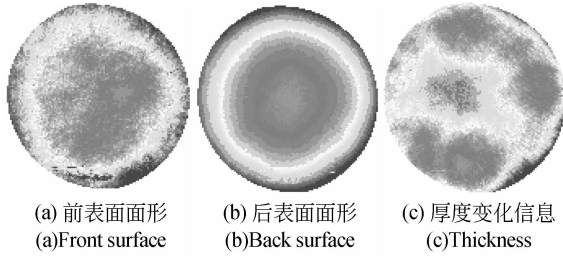


图 4 本文算法计算得到的光学元件面形信息

Fig. 4 Profiles of optical element calculated by proposed algorithm

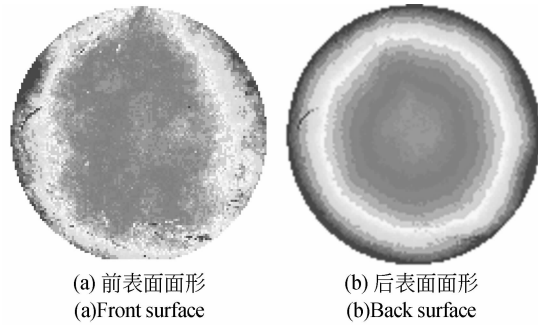


图 5 Zygo 13 步移相算法计算得到的光学元件面形信息
Fig. 5 Profiles of optical element calculated by zygo 13-step phase shifting algorithm

通过比较可知,两种算法测得的面形分布基本一致,测量数据如表 2、表 3 所示。

表 2 本文算法在不同时刻测量结果

Tab. 2 Surface measurement results at different time by proposed algorithm

Differernt time	前表面		后表面	
	PV(λ)	RMS(λ)	PV(λ)	RMS(λ)
1	0.090	0.005	0.132	0.029
2	0.088	0.005	0.128	0.029
3	0.089	0.005	0.131	0.029
4	0.087	0.005	0.130	0.029
5	0.090	0.005	0.129	0.029
平均	0.089	0.005	0.130	0.029

表 3 Zygo13 步移相法不同时刻测量结果

Tab. 3 Surface measurement results at different time by Zygo 13-steps algorithm

Differernt time	前表面		后表面	
	PV(λ)	RMS(λ)	PV(λ)	RMS(λ)
1	0.087	0.004	0.129	0.028
2	0.086	0.004	0.128	0.028
3	0.085	0.004	0.132	0.028
4	0.086	0.004	0.130	0.028
5	0.085	0.004	0.129	0.028
平均	0.086	0.004	0.130	0.028

从表 2、表 3 可以看出,前表面 PV 值相差 0.003λ ,RMS 相差 0.001λ ;后表面 PV 相差 0,RMS 相差 0.001λ 。该结果说明,本文提出的算法得出的面形很接近真实面形,实际测量误差很小。

4 误差分析

从实验结果看出,两种测量方法的结果有微小差异,本文从以下几个方面分析了误差产生的原因。

4.1 被测件均匀性的影响

由于被测件的光学均匀性对后表面的正确测量是有一定的影响的,因此在理论分析中通常假定被测件的光学均匀性很好,这使得实际测量有一定的偏差。假若在实际测量中,被测件的光学均匀性很差,可以在被测件后面加上一块标准镜构成四表面干涉。

4.2 折射率渐变的影响

在波长可调谐移相技术中,被测光学元件的折射率会随着输出激光的改变发生微小的变化,折射率随波长的变化可用下式表示:

$$n(\lambda_0 + \delta\lambda) = n_0 + \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)_0 \delta\lambda + \left(\frac{d^2n}{d^2\lambda}\right)_0 \delta\lambda^2 + \dots, \tag{10}$$

其中: n_0 是 λ_0 时的折射率,也即初始波长时的折射率。由于在实际测量中这个变化量很小,因此在整个测量过程中常设被测光学元件的折射率不变,依然为 n_0 ,但这个近似会对最后的测量结果带来一定的误差。

4.3 气流扰动的影响

在高精度的干涉测量当中,气流的扰动对测量结果的影响很大^[19]。通常整个测试过程要保证在无振动、无空气扰动的情况下进行,因为干涉腔(前标准镜和被测光学元件之间的距离)是裸露的,任何扰动或者振动都会使得整个干涉光程发生微小的变化,以至于干涉条纹产生扭曲,使得最

表 4 论文算法测得前后表面的 Zernike 系数

Tab.4 Zernike coefficients of surface by proposed algorithm

项数	Front surface	Back surface
1	0.001	0.004
2	0.001	0.003
3	-0.001	-0.005
4	-0.007	-0.050
5	-0.001	-0.002
6	0.000	0.002
7	-0.001	0.000
8	0.001	0.001
9	-0.002	-0.005

后计算出来的相位信息并不是真实的被测件的信息,而是含有这些杂散因素引起的面形变化的相位信息。

4.4 Zernike 多项式拟合精度

本研究选用了 Zernike 多项式来拟合被测波面,实验中采用本文算法得到的元件前后表面的 Zernike 系数见表 4,Zernike 多项式项数的选择决定了最后的拟合精度,也会对最后拟合波面的 RMS 值带来影响^[20]。

5 结 论

本文结合波长移相调谐技术和傅里叶变换分析技术,研究了在多表面干涉条纹中提取所需干涉信号的检测技术。该方法只需要通过波长改变量、设置腔长和平板厚度等信息即可以使几组干涉条纹的强度变化频率不同;通过离散傅里叶变换方法,可以求得前后表面及厚度信息。实验结果证明:严格控制 $nT/L=3$ 时,计算得出的前表面 PV 值与传统 13 步移相算法相差 0.003λ ,RMS 相差 0.001λ ;后表面 PV 相差 0 ,RMS 相差 0.001λ ,这说明本文提出的算法得出的面形很接近真实面形,实际测量误差很小,基本可实现平行平板面形的高精度检测。

参考文献:

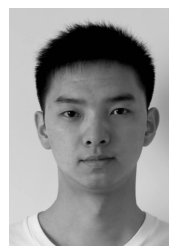
- [1] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. New York:John Wiley& Sons,1992.
- [2] 于藏洁,韦春龙,陈明仪. 移相式数字波面干涉仪中的几个技术问题[J]. 光学 精密工程,2001,9(6): 584-587.
YU Y J, WEI CH L, CHEN M Y. Technical problems in digital phase-stepping flatness interferometers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 584-587. (in Chinese)
- [3] 徐建程. 相位干涉测量的信息理论分析[D]. 四川:中国工程物理研究院,2009.
XU J CH. *Information theory analysis of the phase-measurement interferometry* [D]. Sichuan: CAEP,2009. (in Chinese)
- [4] 朱日宏,陈磊,王青,等. 移相干涉测量术及其应用[J]. 应用光学,2006,27(2):85-88.
ZHU R H, CHEN L, WANG Q, et al.. Phase-shift interferometry and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(2): 85-88. (in Chinese)
- [5] 苏大图. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
SU D T. *Optical Testing Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [6] 从方勇. 平行平板干涉测量技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2008.
CONG F Y. *Research of testing the parallel plates* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 黄玫瑰. 基于变波长激光器测量平行平板的平行度[D]. 南京:南京理工大学,2009.
HUANG M G. *The measuring of the parallel plates via wavelength phase-shifting interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

- [8] 郝晶晶. 波长移相干涉测量技术研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2007.
HAO J J. *Research of the wavelength phase-shifting interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 李文喆. 波长移相干涉的标定方法研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2009.
LI W ZH. *Research of phase shifting calibration of the wavelength phase-shifting interferometry* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] de GROOT P. Measurement of transparent plates with wavelength-tuned phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2658-2663.
- [11] de GROOT P. Optical thickness measurement of substrates using a transmitted wavefront test at two wavelengths to average out multiple reflection errors [J]. *SPIE*, 2002, 4777: 177-183.
- [12] de GROOT P. Method and system for profiling objects having multiple reflective surfaces using wavelength-tuning phase-shifting interferometry: US, No. 6359692 [P]. 2002.
- [13] 徐建程, 石琦凯, 柴立群, 等. 三表面干涉条纹空域傅里叶分析 [J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1260-1264.
XU J CH, SHI Q K, CHAI L Q, *et al.*. Spatial fourier fringe analysis with single three surface interferogram [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2006, 33 (9): 1260-1264. (in Chinese)
- [14] 郭仁慈, 李建欣, 朱日宏, 等. 波长调谐随机移相算法的研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508002-1-0508002-6.
GUO R H, LI J X, ZHU R H, *et al.*. Research on the randomly phase shifting algorithm with wavelength tuning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0508002-1-0508002-6. (in Chinese)
- [15] 于瀛洁, 张本好, 焦云芳. 波长移相干涉仪的算法研究 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6): 560-566. (in Chinese)
YU Y J, ZHANG B H, JIAO Y F. Algorithms of the phase-shifting interferometer via wavelength tuning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 560-566.
- [16] DECK L L. Fourier-transform phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 2003, 42 (13): 2354-2365.
- [17] KENICHI H, *et al.*. Improved algorithms for wavelength scanning interferometry: application to the simultaneous measurement of surface topography and optical thickness variation in a transparent parallel plate [J]. *SPIE*, 2002, 4777: 212-219.
- [18] 孙流星, 于瀛洁. 基于波长移相的改进加权多步算法 [J]. *中国计量学院学报*, 2004, 4(15): 294-298.
SUN L X, YU Y J. Weighted multi-step phase-shifting algorithm developed via wavelength tuning [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2004, 4(15): 294-298. (in Chinese)
- [19] 刘艳, 苏东奇, 杨怀江, 等. 高精度干涉检验移相算法对振动误差的免疫能力 [J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(5): 500-508.
LIU Y, SU D Q, YANG H J, *et al.*. Immunity of phase shifting algorithms to vibration errors in high-accuracy interferometry [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 500-508. (in Chinese)
- [20] 元波, 陈洪斌, 刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 396-400.
QI B, CHEN H B, LIU SH F. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 396-400. (in Chinese)

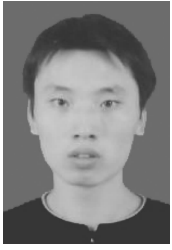
作者简介:



任 寰(1976—), 女, 河北保定人, 博士研究生, 副研究员, 1998 年于重庆大学获得学士学位, 主要从事光学参数检测技术研究。E-mail: huandxj@ yahoo.com.cn



马 力(1988—), 男, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 2010 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事精密光学检测技术的研究。E-mail: horsepower.ma@gmail.com



刘 旭(1983—),男,四川罗江人,硕士,助理研究员,2006年于天津大学获得学士学位,2008年于浙江大学获得硕士学位,主要从事光学参数检测技术的研究。E-mail:zjulixu@gmail.com



何 勇(1966—),男,江苏泰州人,博士,研究员,硕士生导师,1986年、1994年、2004年于南京理工大学分别获得学士学、硕士、博士学位,主要从事光学测量、光电仪器等方面研究。E-mail:heyong@njust.edu.cn



郑万国(1966—),男,湖北人,博士,研究员,博士生导师,1989年于国防科技大学获得学士学位,2001年于中国工程物理研究院获得硕士学位,2006年于复旦大学获得博士学位,主要从事高功率固体激光系统的设计及总体技术研究工作。E-mail:Wgzheng_caep@sina.com



朱日宏(1964—),男,江苏盐城人,博士,教授,博士生导师,1987年、1991年、1993年于南京理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为南京理工大学研究生院副院长,主要从事光学仪器、光学测量和光学图像处理等方面的研究。E-mail:zhurihong@mail.njust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)