

doi: 10.3788/gzxb20164506.0612001

基于白光干涉测试技术的改进 Carré 相移算法

李慧鹏, 谭朦曦, 朱伟伟, 郑晓, 李皎

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要:为了减小白光相移干涉法测量物体微观形貌时产生的误差,对极值法的搜索路径进行优化后与 Carré 相移算法相结合,提出一种基于白光干涉测试技术的改进 Carré 相移算法.该算法减小了光源扰动及电荷耦合元件散粒噪声带来的影响,且对相移器的线性误差不敏感,免去了相位解包裹过程,提高了运算效率.采用单刻线样块对扫描步距进行校准实现了光源中心波长的在线修正,减小了由于光源特性及环境扰动误差带来的影响.采用不同算法对标准粗糙度样块进行三维形貌恢复以及表面粗糙度的重复性测量实验,结果表明:该算法对表面粗糙度的测量结果较传统白光干涉算法准确度提高,测量重复性优于 1%.

关键词:白光干涉;中心波长;线性误差;Carré 相移算法;相位解包裹

中图分类号:TH741; TH744

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)06-0612001-6

Improved Carré Phase Shifting Algorithm Based on White Light Interferometry

LI Hui-peng, TAN Meng-xi, ZHU Wei-wei, ZHENG Xiao, LI Jiao

(Department of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to reduce the error produced by using the white light interferometry while calibrating the microcosmic shape, an improved Carré phase shifting algorithm based on white light interferometry was proposed. The search path of traditional extremum algorithm was optimized, and then combined with the Carré phase shifting algorithm to extract the phase. The proposed algorithm can eliminate the random error caused by the shot-noise of CCD, it do not need to limit the step of the phase adjustments by using the central wavelength of white light and the phase unwrapping is no longer needed, and it makes the computation efficiency improved. The central wavelength on line was modified to reduce the error caused by the characteristic of light and environment disturbance. The three-dimensional topography of standard roughness specimens was restored and the surface roughness was mesured by different kinds of algorithms. The experimental results show that, compared with other algorithms, the accuracy is improved and repeatability is better than 1% by using the proposed improved algorithm.

Key words: White light interferometry; Central wavelength; Linear error; Carré phase shifting algorithm; Phase unwrapping

OCIS Codes: 120.3180; 120.6660; 120.6650; 110.3175

0 引言

随着超精密加工技术的发展,光学测量方法已经成为微纳米尺度三维形貌测试的主要手段^[1-3].1965年,Carré等提出了基于单色光的相移干涉算法^[5],但是被测物表面间断的高度变化或表面粗糙会引起相位

模糊,导致单色光相移干涉法无法准确测量.白光干涉仪以白光作为光源有效地解决了激光干涉仪所带来的相位模糊问题^[4].白光相移干涉法源于单色光相移干涉术,在分析干涉信号强度的同时融合了相位信息,由于其不涉及空域到频域的变换,具有较高的处理效率,可以有效地克服蝙蝠翼现象,因此得到了广泛地研究与

基金项目:国家重大仪器设备开发专项(No.2013YQ040877)资助

第一作者:李慧鹏(1975-),男,副教授,博士,主要研究方向为传感器技术和光电测试技术. Email:lihuipeng@buaa.edu.cn

通讯作者:谭朦曦(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电检测技术. Email:15943066226@163.com

收稿日期:2015-12-31;录用日期:2016-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

应用^[5]. Brian Bowe 等提出了基于极值法的白光干涉算法用于三维形貌的恢复^[5]; 1983 年, Schwider 和 Burow 等首先发现使用平均技术可以有效减小相移器步长误差^[5-6]; 1987 年, Hariharan 提出一种对线性误差敏感的 5 帧相移法, 至今仍被广泛应用^[6-10]. 21 世纪初, Groot 利用 13 帧相移算法实现了对透明结构的测量, 随后 Hibino 和 Schmit 对多帧相移法的误差进行了分析. 天津大学将白光干涉相移法应用于大尺度台阶结构的测量; 清华大学对传统的重心法、相移法、包络曲线拟合法、空间频域算法等几种算法进行了对比分析与研究^[5]. 2013 年, 华中科技大学对重心法及包络曲线拟合法进行了改进^[13]. 提高白光干涉仪的准确度及速度、校正测量中相移器的线性误差和由于光源特性造成的中心波长标定误差是目前研究重点^[6-9]. 因此, 需要更高准确度的形貌恢复算法以及相位解包裹方法^[11,14-15].

本文提出一种基于白光干涉测试技术的改进型误差补偿算法, 将 Carré 相移算法与改进的极值法相结合, 无需相位解包裹即可快速定位零级条纹并解算相干峰. 采用单刻线样块对压电陶瓷 (Piezoelectric Transducer, PZT) 步距进行校准, 并通过校准后的步距在线对中心波长标定误差进行补偿. 基于国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 11562 中规定的高斯滤波器建立高斯滤波中位面^[12], 计算表面粗糙度.

1 测量系统

基于迈克尔逊的白光干涉仪对物体端面的三维形貌测量系统如图 1.

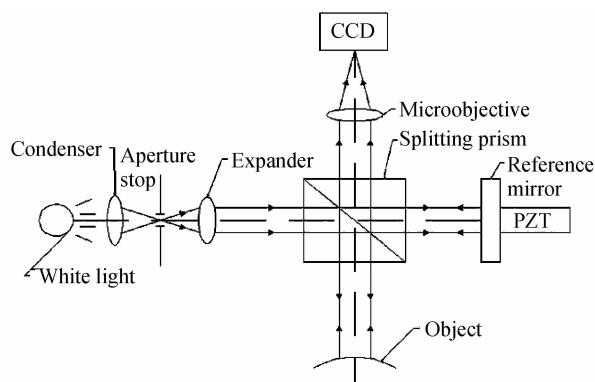


图 1 测量系统原理
Fig. 1 Measuring system

白光干涉仪采用光谱较宽的光源, 光源经过聚光镜、孔径光阑、准直扩束镜到达分光棱镜, 一束经被测物反射, 一束经参考镜反射, 两束光叠加后产生干涉条纹, 最后经显微物镜到达 CCD 成像. 在实际测量过程中, 通过 PZT 带动参考镜移动, 使两束光在被测件不同高度的表面发生干涉, 从而实现被测件表面的形貌

测量.

2 算法分析及改进

白光干涉法是根据 CCD 所采集图像的光强值, 得到物体表面的相对高度值的一种测量方法. 发生干涉时, 各波长将产生各自的干涉条纹, 当参考光和测量光的相位差为零时, 各波长的零级条纹重合, 随着相位差以及干涉级数的增加, 各波长的干涉条纹彼此错开, 干涉条纹的对比度逐渐下降, 直至干涉条纹消失. 与单色光干涉信号的形式不同, 白光干涉信号通常被表示为一个受包络调制的余弦信号, 白光干涉条纹光强与两束光相位差的关系^[5]如图 2.

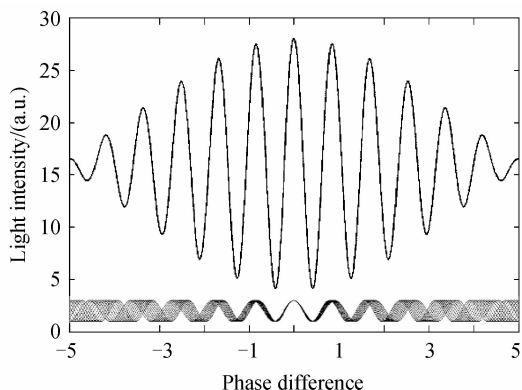


图 2 模拟白光干涉信号

Fig. 2 Simulation of white light interference signal

白光干涉形貌恢复算法的核心在于准确识别和判读零相位差的位置. 相比较于白光相移法、重心法、傅里叶变换法, 极值法由于不需要复杂公式计算, 是基于白光干涉原理最直接的恢复算法, 简单易行, 但要求采样频率较高, 光源波动等干扰因素对测量结果影响较大^[13]. 在实际扫描过程中, 由于工作台的振动以及 CCD 散粒噪声的存在, 导致光强信号的采集存在误差, 会出现 1 级条纹的极大值略高于零级条纹极大值的现象, 如图 3. 实际测量多刻线标准样块时, 通过对噪声点进行分析, 可知该现象出现频率较高, 当被测物表面粗糙度小于 100 nm 时会严重影响表面粗糙度的

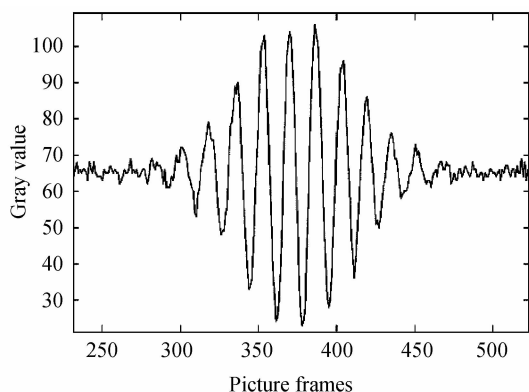


图 3 实测白光干涉信号

Fig. 3 Measurement of white light interference signal

计算.

为了克服由于光源特性及环境扰动带来的零级条纹定位误差,对传统的极值法进行改进,优化了零级条纹的搜索路线.首先定位干涉条纹主极小和次极小,所对应的图像帧数分别为 N_1, N_2 ,在其中间遍历所有点,提取极大值对应的图片帧数 N ,由于受到采样频率的限制,提取到的极大值距离零光程差位置还存在 ϕ 的相位误差,因此需要求解 ϕ 并对其进行修正.在测量过程中,PZT 带动参考镜进行准确地线性移动.压电陶瓷步距设为 d ,则两相邻图像之间的相位变化为 $(4\pi/\lambda)d$.由于压电陶瓷线性误差的存在,相位变化记为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(d + \epsilon) \quad (1)$$

基于 Carré 相移算法^[5]构造一个相位值 $\bar{\varphi}$,令

$$\tan^2 \bar{\varphi} = |[(I_{-3} - I_3) + (I_{-1} - I_1)][3(I_{-1} - I_1) + (I_{-3} - I_3)]| / [(I_{-1} + I_1) + (I_{-3} + I_3)]^2 \quad (2)$$

由光强公式

$$\begin{cases} I_{-3} = I_{bg}[1 + \gamma \cos(\phi - 3\Delta\varphi)] \\ I_{-1} = I_{bg}[1 + \gamma \cos(\phi - \Delta\varphi)] \\ I_1 = I_{bg}[1 + \gamma \cos(\phi + \Delta\varphi)] \\ I_3 = I_{bg}[1 + \gamma \cos(\phi + 3\Delta\varphi)] \end{cases} \quad (3)$$

解得

$$\tan^2 \bar{\varphi} = \tan^2 \phi |[\sin \Delta\varphi + \sin(3\Delta\varphi)][3\sin \Delta\varphi - \sin(3\Delta\varphi)]| / [\cos \Delta\varphi - \cos(3\Delta\varphi)]^2 \quad (4)$$

式(3)、(4)中 φ 为构造的相位, I_{bg} 为背景光强值, I_{-3} 、 I_{-1} 、 I_1 、 I_3 分别为相对于所定位的零级条纹光强值前 3 帧前 1 帧,后 1 帧、后 3 帧对应的光子强值,根据三角函数公式

$$\begin{cases} \sin 3(\Delta\varphi) = -\sin^3 \Delta\varphi + 3\sin \Delta\varphi \cos^2 \Delta\varphi \\ \cos 3(\Delta\varphi) = \cos^3 \Delta\varphi - 3\sin^2 \Delta\varphi \cos \Delta\varphi \end{cases} \quad (5)$$

可以推出

$$\tan^2 \bar{\varphi} = \tan^2 \phi \times 1 \quad (6)$$

由式(6)可知,构造的相位 $\bar{\varphi}$ 与实际相位 ϕ 相等,而与 $\Delta\varphi$ 无关,因此这种方法对于压电陶瓷的线性误差 ϵ 不

敏感.

通过提取到的相位解算被测物的相对高度值,得

$$h = N \times d - (\lambda/4\pi)\phi \quad (7)$$

由式(7)可知,其相对高度 h 受压电陶瓷步距以及光源中心波长影响.需对压电陶瓷步距进行标定,采用标准的单刻线粗糙度样块,如图 4.提取同一行不同高度的两点光强极值对应的图片帧数,即可通过鉴定的高度值算出修正的步距 \bar{d} .

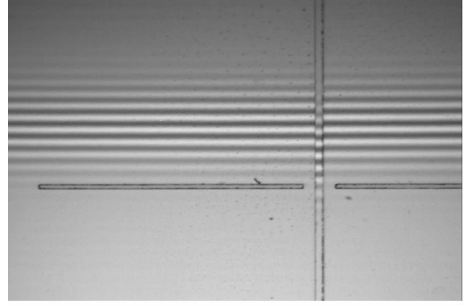


图 4 单刻线样块干涉图

Fig. 4 Interferogram of sample piece

由于光源特性及环境扰动等因素会带来的中心波长标定误差,可通过公式

$$\bar{\lambda} = 2n \times \bar{d} \quad (8)$$

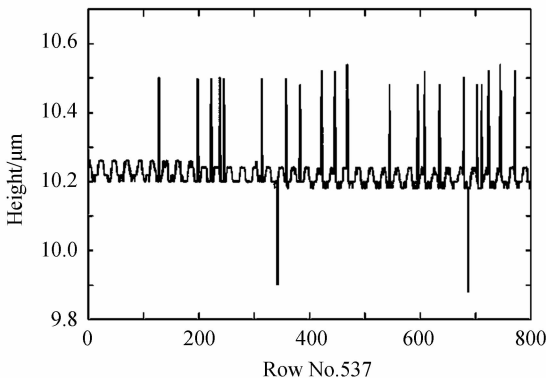
进行光源中心波长的修正,其中

$$n = |N_1 - N_2| \quad (9)$$

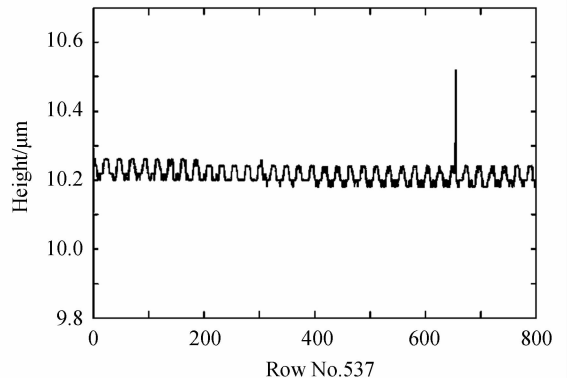
在实际测量中,通过定位的零级条纹所包含的图片帧数来计算修正后光源的中心波长,即可实现实时的在线标定.

3 实验验证

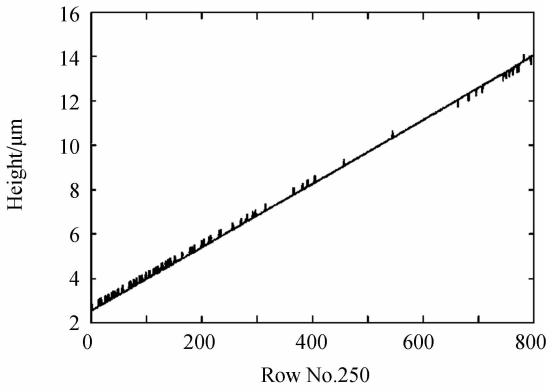
分别采用传统的极值法结合 Carré 相移法与改进后的极值法结合 Carré 相移法对表面粗糙度 R_a 为 20nm 的多刻线样块进行三维形貌的恢复,提取其中一行及一列的二维形貌,如图 5.从实测的二维图中可以看出,改进算法有效减小了相位提取时的粗大误差.



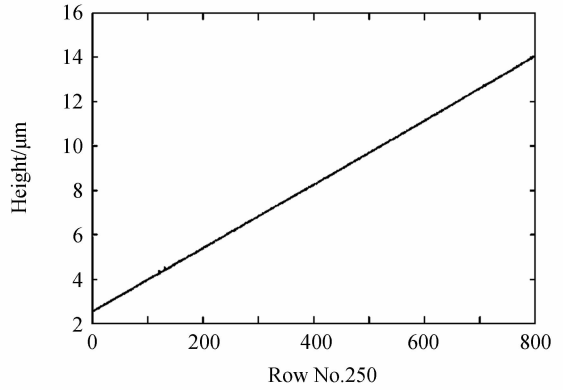
(a) Traditional algorithm to restore one row



(b) Improved algorithm to restore the same row



(c) Traditional algorithm to restore one line



(d) Improved algorithm to restore the same line

图5 对标准样块恢复形貌二维图

Fig. 5 Two-dimensional of the restoration of the sample piece

分别采用重心法^[13]、插值法、三帧法^[5]、Hariharan 算法^[10]以及改进算法对高度为 4.42 μm 的单刻线样块进行了测量,由于其他白光干涉相移算法将扫描步

距限定在了 λ/8,故将扫描步距设为 72 nm,测量结果见表 1.

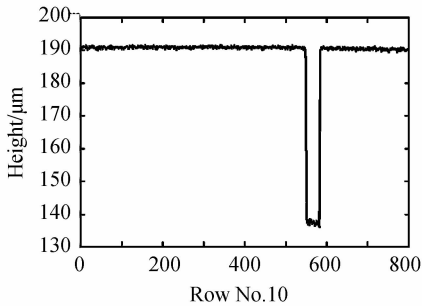
表 1 对 4.42 μm 单刻线样块的重复性测量

Table 1 Repeatability measurement of the sample piece which is 4.42 μm high

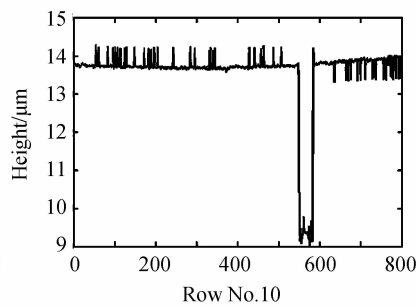
No.	Algorithms					
	Volts/nm	Gravity algorithm	Interpolation algorithm	Three frames algorithm	Hariharan algorithm	Improved algorithm
1		5.30	4.49	4.32	4.49	4.39
2		5.34	4.33	4.34	4.69	4.38
3		5.13	4.69	4.26	4.53	4.39
4		5.17	4.73	4.89	4.26	4.41
5		5.08	4.32	4.39	4.39	4.43
6		5.23	4.56	4.83	4.44	4.40
7		5.29	4.48	4.92	4.43	4.46
8		5.13	4.61	4.54	4.41	4.43
9		4.92	4.26	4.82	4.59	4.46
10		4.87	4.38	4.12	4.39	4.46
	Mean value/μm	5.146	4.485	4.543	4.462	4.421
	Standard deviation/μm	0.157	0.162	0.297	0.120	0.031

测量结果表明,改进算法与标准值的偏差很小,重复性明显优于其他传统的空域算法及白光相移干涉算法.截取同一行数据进行对比,结果如图 6.可以看出

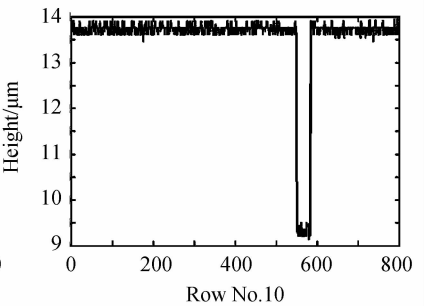
较其他几种算法相比,改进算法可以很好地抑制噪声,甚至无需滤波即可达到平滑的效果,为后续计算提高了准确度.



(a) Gravity algorithm



(b) Interpolation algorithm



(c) Three frames algorithm

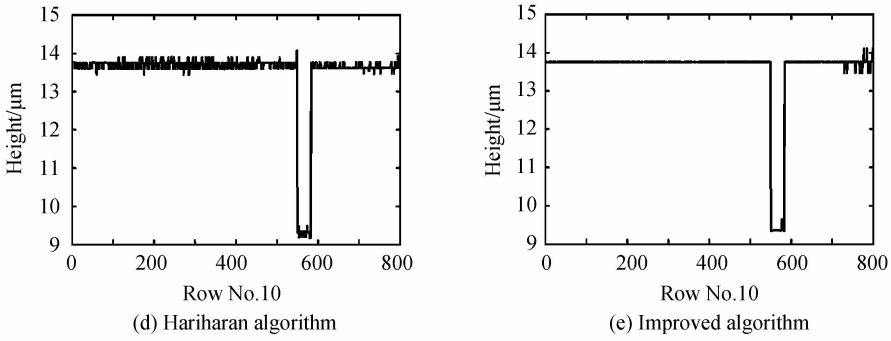


图6 不同算法对同一行的数据对比

Fig. 6 Comparison of data in the same row with different kinds of algorithms

最后对表面粗糙度 R_a 为 20 nm、50 nm、107 nm 的多刻线样块进行了三维形貌的恢复,根据国际标准

ISO11562^[12] 推荐的高斯滤波法确定表面特征评定的基准面,如图 7.

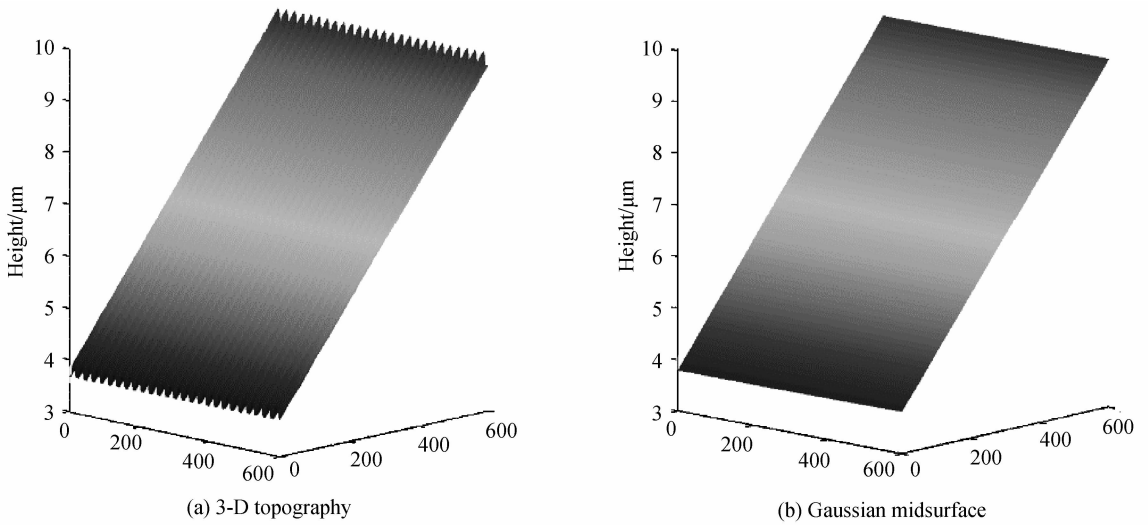


图7 三维形貌的恢复以及高斯面的建立

Fig. 7 Restore the 3-D topography and establish the Gaussian midsurface

针对采样频率对测量准确度的影响,在步距为 20 nm、30 nm、40 nm、50 nm、60 nm 时对表面粗糙度 R_a 为 107 nm 的多刻线样块进行了表面粗糙度测量实

验,测量结果见表 2. 表面粗糙度 R_a 的重复性测量结果见表 3.

表 2 不同步距下对多刻线样块粗糙度重复性测量

Table 2 Reatability measurement of the sample piece based on different steps

No.	Algorithms					
	Voltves/nm	20	30	40	50	60
1		103.2	102.6	102.9	102.1	102.0
2		103.5	102.8	102.6	102.3	102.0
3		103.5	102.8	102.6	102.0	101.9
4		103.5	102.6	102.8	102.1	102.1
5		103.4	102.6	102.6	102.1	102.0
	Mean value/nm	103.42	102.68	102.70	102.10	102.00
	Standard deviation/nm	0.130	0.110	0.141	0.122	0.071

实验结果表明:在不同扫描步距下采用改进后的极值法依然能够有效地减小由于振动以及 CCD 散粒噪声带来的误差,准确地将极大值限定在零级条纹

内,减小了测量重复性误差.结合 Carré 相移法进行相位补偿,并在线修正光源中心波长,可提高表面粗糙度的测量准确度.

表 3 3 种多刻线样块表面粗糙度 R_a 的重复性测量
Table 3 Repeatability measurement of 3 kinds of sample pieces

No.	Roughness/nm		
	$R_a=20$	$R_a=50$	$R_a=107$
1	20.2	51.6	103.2
2	20.3	52.0	103.5
3	20.7	51.8	103.5
4	19.0	51.8	103.5
5	19.1	51.9	103.3
6	19.5	51.6	103.4
7	20.4	51.5	103.5
8	19.2	51.2	103.4
9	19.6	51.3	103.5
10	19.1	51.4	103.6
Mean value/nm	19.71	51.61	103.44
Standard deviation/nm	0.633	0.264	0.117

5 结论

本文提出一种基于白光干涉测试技术的改进 Carré 相移算法. 通过改进的极值法结合 Carré 相移法, 有效地减小了由于环境扰动以及 CCD 散粒误差带来的影响, 提高了表面粗糙度的测量准确度. 在相位构造时, 消除了系统的线性相移误差, 与其他多帧相移法进行对比, 无需通过光源中心波长限定相移器步距; 较传统的 Carré 相移法相比, 免去了相位解包裹运算, 缩短了运算时间; 与较传统白光干涉算法相比, 提高了对表面粗糙度的测量准确度, 测量重复性优于 1%. 采用单刻线样块对扫描步距进行校准实现了光源中心波长的在线修正, 提高了运算效率.

参考文献

- [1] SAFRANI A, ABDULHALIM I. Real-time phase shift interference microscopy[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(17): 5220-5223.
- [2] JIANG Yi. White light interferometry for the measurement of extrinsic Fabry-Perot interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 381-384.
江毅. 测量光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪的白光干涉术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 381-384.
- [3] SU Yin, FAN Qi, WANG Yun-fei, et al. Fourier transform method for interferogram analysis with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1112004.
粟银, 范琦, 王云飞, 等. 干涉条纹的高准确度傅里叶变换分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1112004.
- [4] MA Sen, XIE Fang, WANG Yun-zhi, et al. High precision on-line measurement of step height based on fiber dual-

wavelength interferometry[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, **25**(9): 1749-1753.

- 马森, 谢芳, 王韵致, 等. 基于光纤双波干涉的台阶高度在线高准确度测量研究[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(9): 1749-1753.
- [5] 马龙. 白光扫描干涉测量方法与系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
 - [6] ZHAO Zhi-liang, XIA Bo-cai, CHEN Li-hua, et al. Self-correction of step error in phase shifting interferometric measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1116-1121.
赵智亮, 夏伯才, 陈立华, 等. 相移干涉测量中误差的自修正[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(5): 1116-1121.
 - [7] JIAO Guo-hua, LI Yun-lin, HU Bao-wen. Mirau phase-shifting interferometer for profile measurement of microlenses array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1924-1929.
焦国华, 李育林, 胡宝文, 等. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面形[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1924-1929.
 - [8] YANG Yun-xiao, XIONG Kai-li, SUN Yan, et al. Study of nanometer scale thickness testing method of film based on the white-light interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 973-978.
杨玉孝, 熊开利, 孙艳, 等. 光纤白光干涉法与膜厚纳米测量新技术研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1924-1929.
 - [9] RAÚL D L F. White light spectral interferometry as a spectrometer calibration tool[J]. *Applied Spectroscopy*, 2014, **68**(5): 525-530.
 - [10] HARASAKI A, SCHMIT J, WYANT J C. Improved vertical-scanning interferometry[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(13): 2107-2115.
 - [11] GAO Fen, JIANG Zhuang-de, LI Bing, et al. Multi-step phase-shifting algorithm based on extended averaging technique and its error suppression characteristics comparison [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0426001.
高芬, 蒋庄德, 李兵, 等. 基于扩展平均的多步相移算法及误差抑制特性比较[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0426001.
 - [12] ISO 11562-1996. Geometrical product specifications (GPS)-surface texture; profile method-metrological characteristics of phase correct filters [S]. Switzerland: International Organization For Standardization, 1998.
 - [13] 徐海涛. 垂直扫描白光干涉测量关键技术的研究及应用[D]. 湖北: 华中科技大学, 2013.
 - [14] BEMHARD W, ONDREJ H, GERD H. Improved white-light interferometry on rough surfaces by statistically independent speckle patterns[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(6): 751-757.
 - [15] LAOPORNPICHAYANUWAT W, VISESSAMIT J, TIANPRATEEP M. 3-D surface roughness profile of 316-stainless steel using vertical scanning interferometry with a superluminescent diode[J]. *Measurement*, 2012, **45**(10): 2400-2406.