

文章编号 1004-924X(2013)05-1160-07

# 菲涅耳微透镜芯模表面形貌的检测及加工误差分析

邹文栋\*, 刘佳, 王星星, 江茂清, 龚勇清

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

**摘要:**采用扫描白光干涉法对菲涅耳微透镜芯模表面浮雕结构进行了检测,并对元件表面微观形貌进行了三维重建。根据其表面形貌数据,引入幅度参数表征法,分别计算出横向线宽误差以及样品的系统刻蚀深度误差和随机刻蚀深度误差等纵向加工偏差。通过表面高度分布的偏斜度、表面高度分布的峭度等参数获得了有关微芯模表面误差和缺陷的量化信息。实验研究表明,扫描白光干涉法能精确量化表征微芯模表面形貌特征,这对探索适用于新型微光学器件表面三维形貌误差的无损检测评价方法具有实际意义。

**关键词:**菲涅耳微透镜;菲涅耳波带板;芯模;扫描白光干涉术;三维形貌;加工误差

**中图分类号:**O436.1;TH744.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1160

## Measurement and fabrication error analysis of FZP core mould

ZOU Wen-dong\*, LIU Jia, WANG Xing-xing, JIANG Mao-qing, GONG Yong-qing

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

\* Corresponding author, E-mail: 18979106189@189.cn

**Abstract:** To obtain the surface topography of micro core mould for a Fresnel micro-lens, scanning white light interferometry was used to test its surface relief structure. Then, the surface micro topography of the Fresnel micro-lens was reconstructed. With obtained topography data and introduced amplitude parameters, the fabrication errors on transverse line width, longitudinal systematic etching depth and random etch depth of the Fresnel Zone Plate(FZP) were calculated, respectively. By surface height distribution parameters, such as skewness and kurtosis, the micro mandrel surface errors and quantitative defect information were obtained. Experimental results show that scanning white light interferometry can characterize the surface topography of micro core mould for Fresnel micro-lens quantitatively and exactly, and the method proposed has practical significance for a non-destructive testing and evaluation for three-dimensional surface morphology of micro-optics.

**Key words:** Fresnel micro-lens; Fresnel Zone Plate(FZP); core mould; scanning white light interferometry; three-dimensional topography; fabrication error

收稿日期:2012-11-12;修订日期:2013-02-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51241005);江西省自然科学基金资助项目(No. 2008GZW0011, No. 20122BAB202010);江西省科技支撑计划资助项目(No. 20122BBE500040);无损检测技术教育部重点实验室开放基金资助项目(ZD200929002);南昌航空大学研究生创新基金资助项目(No. YC2011014)

## 1 引言

光学树脂注射成型是一种极具应用前景的二元光学元件复制技术<sup>[1]</sup>,其中微芯模是决定元件质量的关键因素之一。在微芯模的制作过程中,由于表面微观结构图形线宽分布不均匀或刻蚀时间难以准确控制,以及掩模图制作过程或掩模图转印过程中的图形内部相对或整体偏移,从而导致芯模表面的刻蚀深度、横向线宽以及对准等方面的加工误差,这些误差都会降低二元光学器件的使用性能<sup>[2]</sup>。因此,对二元光学器件微芯模表面进行纳米尺度的检测分析是保证器件参数满足精度要求的重要手段。

目前,可以实现微观表面三维形貌检测的方法有很多,根据原理不同,可以分为:机械探针法、光学探针法、扫描探针显微镜法(Scanning Probe Microscope, SPM)、扫描电子显微法(Scanning Electron Microscope, SEM)和干涉显微法等。其中,机械探针法属于接触测量,且测量的精度受探针针头直径的限制;光学探针法需要高精度的调焦系统;SPM测量的精度较高,但技术难题多且对操作的环境要求高;SEM适合定性测量,仅能得到二维的测量数据且费时。干涉显微法采用光波干涉原理,其中,白光干涉法由于能够克服相位模糊问题,适用于复杂轮廓测量,已被广泛应用于各类表面的三维表征<sup>[3-5]</sup>。本文采用扫描白光干涉法检测菲涅耳微透镜芯模的表面浮雕形貌结构,具有检测精度高、无损、快速和成本低等特点。

关于三维形貌的特征分析有多种方法,如拟合中线制法、参数表征、3D-Motif法、分形几何法以及功率谱法等。相对来说,采用参数表征法表征微透镜的形貌特征有效可行。目前,光学以及机械加工表面评定参数共有40余种,英国伯明翰大学为防止参数爆炸开发了包含14个数字表征参数在内的“最小体系”,这14个数字表征参数按照表征特性可以划分为幅度参数、功能参数、综合参数、空间参数等<sup>[6-7]</sup>。针对菲涅耳微透镜表面形貌对其使用特性的典型影响,结合芯模的制作工艺,本文选用一些幅度参数对样品表面误差进行了表征。实验显示,进行菲涅耳微透镜芯模表面质量的测量分析实验,对探索出一种适用于新型微光学器件表面三维形貌误差的无损检测评价方法具有实际意义。

## 2 菲涅耳微透镜芯模表面三维形貌检测

### 2.1 实验样品的制备

菲涅耳微透镜是一种正面刻录着按一定规律排列同心圆台阶的位相型平板光学元件。实验中所用微透镜芯模样品制作方法为:通过如图1所示的掩模板,在覆盖有光刻胶的高温合金基片上通过DMD数字空间光调制和精缩光学系统曝光、显影,再经刻蚀,最后去胶即得到需要的菲涅耳微透镜阵列芯模,如图2所示为制作的微透镜芯模单元表面显微图像。由于金属基片经研磨抛光后重复使用,表面会有划痕,另外,实验中采用化学腐蚀刻蚀,台阶底面和边角不平整,但这反而能提供更多的误差信息,有利于光学器件三维形貌检测及误差分析方法的实验研究。基于此目的,实验中,我们选用粗糙的自制器件。

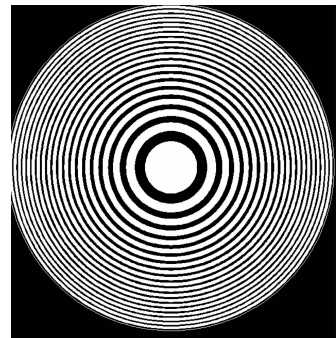


图1 菲涅耳微透镜制作的掩模图案

Fig. 1 Mask design for Fresnel micro-lens

实验样品各级环带的线宽设计参数可近似为:

$$L = r_0(\sqrt{m} - \sqrt{m-1}), \quad (1)$$

式中: $m$ 为第 $m$ 级环带; $r_0 = 92.3 \mu\text{m}$ ,为中心环半径; $L$ 为环带线宽尺寸。

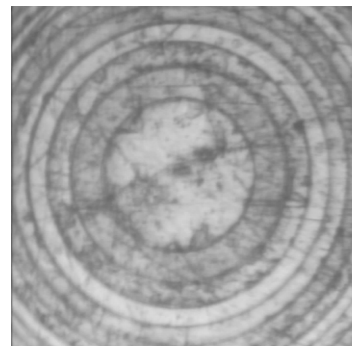


图2 菲涅耳微透镜芯模表面显微图像

Fig. 2 Microscopic image of FZP core mould

## 2.2 菲涅耳微透镜芯模表面形貌的检测

所用的扫描白光干涉检测装置如图 3 所示,系统采用 Linnik 结构,白光 LED 发出的光,由透镜扩束后经分束器分束,再分别显微聚焦照射于参考面和被测物表面,经 2 个面反射并通过显微放大系统后返回,于分束器汇合后在像方位置形成干涉,系统光学放大率 $\sim 10\times$ ;另一方面,由计算机控制驱动压电陶瓷(PZT),实现白光干涉检测系统步进式空间扫描,CCD 图像传感器将采集到的干涉信号保存到计算机中,供后续分析处理。经过标准台阶测试标定,系统的纵向检测精度优于 5 nm。

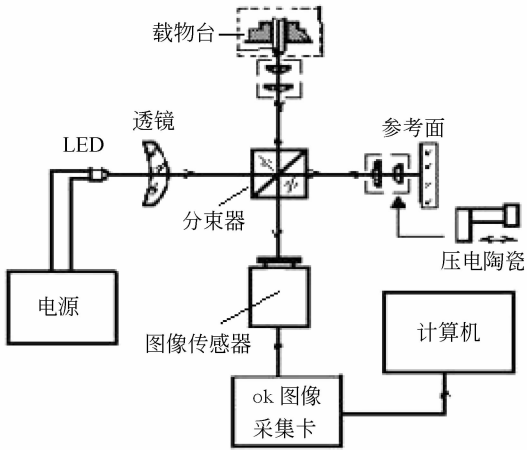


图 3 扫描白光干涉系统

Fig. 3 Scanning white light interferometry

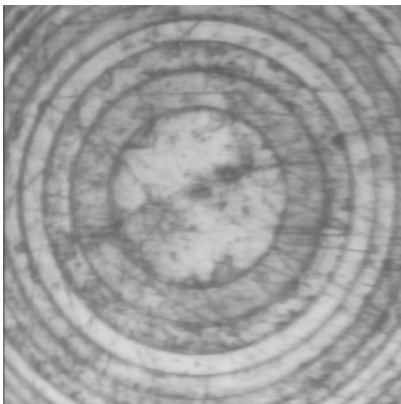


图 4 单张菲涅耳微透镜芯模表面干涉图

Fig. 4 Single interferogram of FZP core mould surface

在零光程差附近作扫描,在扫描的过程中对干涉信号做采样。图 4 为单张样品表面干涉图片。由于微芯模金属基片因腐蚀导致表面粗糙,

反射率低,干涉条纹可见度很小,不如普通光学表面形成的典型干涉条纹清晰,这也是本实验的主要困难之一。单张样品干涉图与其表面显微图片差异很难用肉眼分辨,只有在的一组图片连续翻看的情况下,才能看到淡淡的干涉条纹在样品表面移动。

运用一种基于直接余弦傅里叶分析的方法<sup>[8]</sup>,得到样品被检测区域每个像素点的干涉位相函数,再将其代入式(2)中,就可推算得到菲涅耳微透镜芯模表面被检测区域每一点的相对高度:

$$\Delta h = \frac{1}{2n_G} \frac{d\varphi}{dk}, \quad (2)$$

式中: $\varphi$  为位相, $k$  为波矢, $n_G$  为群折射率。

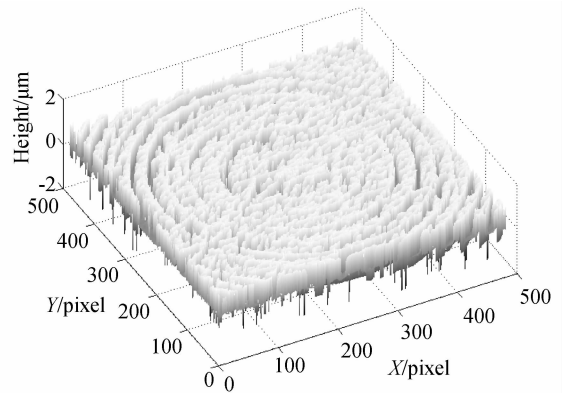


图 5 菲涅耳微透镜芯模表面三维形貌

Fig. 5 3D reconstruction map of FZP core mould surface

由此可重建出样品表面的三维形貌,如图 5 所示,从图中可以直观地看到该菲涅耳微透镜样品表面有许多划痕,这与基片表面打磨有关;另外存在许多边沿缺口,这与腐蚀刻蚀工艺相关。

依据得到的菲涅耳微透镜表面三维重建形貌数据,可以实现对样品环带刻蚀深度、线宽误差以及其它参数的定量分析。

## 3 表面形貌分析

菲涅耳微透镜芯模在制作过程中,由于设备、环境以及元件表面刻蚀时间等因素的影响,实际加工出的样品表面微观形貌与设计尺寸并不完全一致,存在刻蚀深度误差、横向刻蚀线宽误差等加工误差,这些误差将影响制作的二元光学器件的

衍射效率及其它使用性能<sup>[9-11]</sup>。为便于更直观地分析可能出现的菲涅耳微透镜加工误差,借助重建出的芯模表面微观形貌数据进行分析。得到的样品表面横向二维剖面如图6所示,图中清晰地显示出样品表面的纹理特性、台阶的刻蚀深度以及各环带线宽尺寸等信息。为突出高度信息,剖面图纵坐标采以微米为单位,而横坐标采用像束数,纵横长度当量比改变了1 000多倍,看上去高度起伏很尖锐。

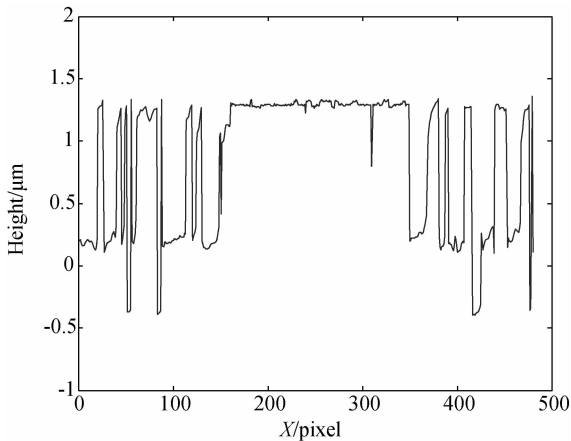


图6 菲涅耳微透镜芯模剖面图

Fig. 6 Cross-section profile of FZP core mould

表面三维形貌数据为分析菲涅耳微透镜芯模表面的特征提供了丰富的信息。经过数字滤波处理,可以分别得到表面粗糙度、波纹度和轮廓数据。由表面轮廓可以计算样品的各类横向误差和系统刻蚀纵向误差,由粗糙度可以计算随机刻蚀深度误差,实现各类误差的定量化分析。

### 3.1 样品横向误差

菲涅耳微透镜各级环带中的线宽并不相同,以样品第三环带为例进行测试分析。对剖面图进行低通平滑滤波得到轮廓,并通过对不同环带旋转平均定心,再进行边缘检测,算法以高度落差最大处作为备选边缘点,并沿旋转切向做连续统计平均,剔除断点和小于高度差阈值的点,最后得到边缘轮廓。采用由干涉位相获得的剖面图进行边缘检测,其精度比通过二维显微图像的光强信息进行边缘检测的精度高,最后对多幅剖面图参数取平均后得到的数据如表1所示:

表1 菲涅耳微透镜芯模表面第三环带线宽参数

Tab. 1 Third zone width of FZP core mould

参数	数值
设计参数/ $\mu\text{m}$	29.350
实测数据/ $\mu\text{m}$	25.050
误差/ $\mu\text{m}$	-4.300
相对误差/%	-14.65

从表格数据可知,样品第三环带实测数据与设计参数相比存在一定的线宽误差。

### 3.2 样品纵向误差

从图6可以明显看到,菲涅耳微透镜样品各级次环带台阶深度存在起伏变化,样品台阶表面纵向刻蚀误差会导致其衍射效率及其它使用性能的降低,因此分析菲涅耳微透镜表面纵向误差信息对于完善其制作工艺具有重要的参考价值。采用幅度参数体系,包含表面高度的三方面信息:极值特性、统计特性以及分布形状,所以常被用于光学和机械加工表面形貌的表征,而应用于微光学元件形貌纵向特性分析,有其独特的作用。针对二元光学微光学器件的制作工艺和纵向加工误差问题,仅采用了与表面轮廓高度特性相关的几个幅度参数,具体包括以下几个方面<sup>[12-13]</sup>:

(1) 表面轮廓的算术平均偏差  $R_a$

它是表面轮廓偏距的算术平均值,描述表面轮廓高度偏离其基准面的程度,表示被测表面的微观不平整度以及其较小间距范围内由峰谷构成的微观几何形状:

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z(x_i, y_j)|, \quad (3)$$

式中: $M, N$ 为采样区域内 $x$ 方向和 $y$ 方向的离散采样点数,采样区域边长为3.84 mm,采样点数为 $480 \times 480$ 。 $z(x, y)$ 是样品表面形貌的残差表面,表示样品三维形貌与其基准面的差值。最小二乘平均面是3-D形貌评定的最合适基准面,为简单起见,实验分析过程中将菲涅耳微透镜表面的算术平均基准平面作为参考基准面。

(2) 表面轮廓的均方根偏差  $R_q$

表示在有限的采样区域内,表面轮廓高度偏离参考基准的均方根值RMS,其离散形式为:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}. \quad (4)$$

$R_a$ (或  $R_q$ )是世界各国的国家标准所广泛采用的粗糙度主参数。对于同一取样范围内的离散数据,表面轮廓的算术平均偏差  $R_a$ 和均方根偏差  $R_q$ 之间有如下关系:

$$R_a \leq R_q. \quad (5)$$

(3)表面高度分布的偏斜度  $S_{sk}$

偏斜度表示样品表面偏差相对于其基准表面的对称性的度量,离散表达式为:

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j). \quad (6)$$

若  $S_{sk} = 0$ ,说明样品表面高度对称分布;若  $S_{sk} < 0$ ,则说明样品表面的分布在低于基准面的一边有大的“尖峰”;若  $S_{sk} > 0$ ,则说明样品表面的分布在高于基准面上有大的“尖峰”。

(4)表面高度分布的峭度  $S_{ku}$

反映样品表面形貌高度分布的形状,是被测样品表面形貌高度分布的峰度和峭度的度量:

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j). \quad (7)$$

高斯表面的峭度为 3;若  $S_{ku} > 3$ ,表明表面形貌高度分布集中在中心;若  $S_{ku} < 3$ ,表明表面形貌高度分布较分散。

(5)表面十点高度  $R_z$

表示在有限的采样区域内,样品表面 5 个高顶点的高度和 5 个最深凹坑的深度的平均值:

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |\eta_i| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{i1}| \right]. \quad (8)$$

依据以上幅度参数法中各评定参数的数学模型,可以计算分析菲涅耳微透镜表面的纵向误差特性。纵向误差又包括系统刻蚀误差和随机刻蚀深度误差,下面分别予以讨论分析。

### 3.2.1 系统刻蚀误差

由于菲涅耳微透镜中间线条宽边缘线条窄和刻蚀工艺内部因素而引起刻蚀深度系统地变深或变浅,称为系统刻蚀误差。我们根据表面轮廓数据可以求出环带台阶的相对深度误差:

$$E_m = \frac{d_m - d_0}{d_0}, \quad (9)$$

式中: $d_m$ 为第  $m$  环带台阶深度, $d_0$ 为台阶深度的设计值,本实验样品的台阶高度设计值为  $1 \mu\text{m}$ 。实际求得各环带台阶的平均高度如表 2 所示:

表 2 菲涅耳微透镜芯模各环带台阶平均深度

Tab. 2 Average depth of different FZP zones

环带序号	台阶平均深度/ $\mu\text{m}$	误差/ $\mu\text{m}$	相对误差/%
2	1.340	0.340	34
4	1.330	0.330	33
6	1.330	0.330	33
8	1.320	0.320	32

各环带的相对深度误差加权平均为 33.3%,根据多相位器件的特性,这会导致微透镜的衍射效率严重下降。

表 3 是运用幅度参数模型对表面轮廓进行计算得到的结果。由得到的样品表面高度分布偏斜度  $S_{sk}$  为  $-0.6243$  可知,样品表面的分布在低于基准面的一边有大的“尖峰”,说明台阶底部局部存在较大深度起伏,这主要是由于采用腐蚀刻蚀技术,受温度影响,过刻蚀难以控制,造成表面凹凸不平,甚至有金属微碎片脱落。从截面图可以看出凹坑深度在  $0.5 \mu\text{m}$  左右。另外,表面高度分布的峭度  $S_{ku}$  为  $1.7942$ ,说明样品表面形貌高度分布较分散,与 FZP 表面形貌特征一致。

表 3 表面形貌轮廓参数

Tab. 3 Amplitude parameters of sample profile

幅度参数	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$S_{sk}$	$S_{ku}$	$R_z/\mu\text{m}$
参数值	0.5283	0.5587	$-0.6243$	1.7942	1.7115

### 3.2.2 随机刻蚀深度误差

器件刻蚀深度随机波动引起的深度误差,这种误差在一定范围内各种概率是相等的。随机刻蚀深度误差在幅度上和特性上应该表现为粗糙度,为此,将三维形貌数据进行高通滤波,得到粗糙度信息。再运用幅度参数模型进行计算,得到第 1 环带平台和第 2 环带底部区域的粗糙度参数如表 4 所示:

表 4 表面区域粗糙度参数

Tab. 4 Roughness parameters of different surface areas

环带序号	$R_a/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$
1	0.0158	0.0415
2	0.2883	0.2966

显然,粗糙度在不同区域的分布是不同的,环带沟槽底面由于化学腐蚀刻蚀就比环带上平台面粗糙许多,样品的随机刻蚀深度误差主要产生并取决于腐蚀过程。

## 4 结 论

采用扫描白光干涉法对菲涅耳微透镜芯模表面浮雕结构进行检测,并对元件表面微观形貌进行了三维重建。将计算得到的样品表面横向刻蚀线宽尺寸及刻蚀深度与原始设计参数进行比较,得到了菲涅耳微透镜芯模的加工误差数据。实验显示,运用实验获得的三维形貌数据得到的截面轮廓曲线进行边缘检测及横向误

差测量比直接采用二维显微图像进行边缘检测的精度高,后者由于芯模金属腐蚀表面图像轮廓模糊不清,影响传统边缘检测方法精度,而前者依靠扫描白光干涉术纳米级的纵向检测精度来提高横向精度。在纵向误差的表征分析方面,引入幅度参数法,通过截面轮廓曲线提取粗糙度、波纹度和轮廓信息;然后运用幅度参数,表征出菲涅耳微透镜芯模样品的系统刻蚀误差和随机刻蚀深度误差;通过表面高度分布的偏斜度、表面高度分布的峭度等参数来实现表面形貌特征的定量化表征。本文的工作可以获得有关微芯模表面误差和缺陷的量化信息,可为二元光学器件质量评价以及制作工艺的完善提供客观的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 龚勇清,刘智怀,高益庆,等. 一种二元光学元件阵列微芯模的工艺设计研究[J]. 应用光学, 2009, 30(2):304-308.  
GONG Y Q, LIU ZH H, GAO Y Q, et al.. Process design for micro core mould of binary optical element [J]. *Journal of Appl. Opt.*, 2009, 30(2):304-308. (in Chinese)
- [2] 杨国光. 微光学与系统[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.  
YANG G G. *Micro-optics and System* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 杨天博,郭宏,李达成. 白光扫描干涉测量算法综述[J]. 光学技术, 2006, 32(1):115-120.  
YANG T B, GUO H, LI D CH. The summary of algorithms for white-light scanning interferometry [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1):115-120. (in Chinese)
- [4] 邹文栋,黄长辉,欧阳小琴,等. 合金韧窝断口三维微观形貌的白光相移干涉检测重构及分形表征[J]. 中国机械工程, 2010, 21(22):2675-2678.  
ZOU W D, HUANG CH H, OUYANG X Q, et al.. White light phase-shifting interferometer detection, reconstruction and fractal characterization of alloy dimple fracture 3D microstructure [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(22): 2675-2678. (in Chinese)
- [5] 邹文栋,黄长辉,欧阳小琴,等. 合金韧窝断口微观形貌的扫描白光干涉三维检测重构及 Motif 表征[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10):8-13.  
ZOU W D, HUANG CH H, OUYANG X Q, et al.. Scanning white-light interferometric measurement, 3-D reconstruction and motif evaluation of alloy dimple fracture microtopography [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(10):8-13. (in Chinese)
- [6] DONG W P, SULLIVA P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterization 3-D surface topography-III [J]. *Wear*, 1994, 178(1):29-43.
- [7] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Comprehensive study of parameters for characterization 3-D surface topography-III [J]. *Wear*, 1994, 178(1): 45-60.
- [8] 邹文栋,黄长辉,郑瑜,等. 用扫描白光干涉术检测合金韧窝断口微观三维形貌[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1612-1618.  
ZOU W D, HUANG CH H, ZHENG Q, et al.. Measurement of microscopic surface topography of alloy dimple fracture by scanning white-light interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1612-1618. (in Chinese)
- [9] 李思涛,叶嘉雄. 二元光学元件的制作及其误差分析[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(5):24-29.  
LI S T, YE J X. Fabrication and error analysis of binary optical elements [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2000, 13(5): 24-29. (in

Chinese)

- [10] 李红军,赵晶丽. 二元光学元件制作过程中的线宽误差[J]. 光电子·激光, 2000,11(3):279-281.  
LI H J, ZHAO J L. Linewidth error in fabrication of binary optical element [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2000,11(3):279-281. (in Chinese)
- [11] 郑学哲,严瑛白,金国藩,等. 对准误差对二元光学器件衍射效率的影响[J]. 光电子·激光,1997,8(4):241-245.  
ZHENG X ZH, YAN Y B, JIN G F, et al.. Effect of alignment error on binary optics element efficiency [J]. *Journal of Optoelectronics · La-*

*ser*, 1997,8(4):241-245. (in Chinese)

- [12] 徐德衍,王青. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京:科学出版社,2009.  
XU D Y, WANG Q. *Test and International Standard for Contemporary Optical Components* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [13] 李成贵,董申. 三维表面微观形貌的表征参数和方法[J]. 宇航计测技术, 1999, 19(6):33-43.  
LI CH G, DONG SH. The parameters and methods of characterizing 3-D surface microtopography [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1999,19(6):33-43. (in Chinese)

#### 作者简介:



**邹文栋**(1965—),男,浙江余姚人,教授,硕士生导师,1986年于浙江大学获学士学位,1989年于华南师范大学获得硕士学位,主要从事微纳光子学及应用方面的研究。E-mail: 18979106189@189.cn



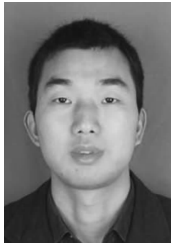
**江茂清**(1985—),男,福建漳州人,助理工程师,2012年于南昌航空大学获得硕士学位,主要从事微纳检测方面的研究。E-mail: tojmq@126.com



**刘佳**(1984—),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要从事微纳检测方面的研究。E-mail: 103010474@qq.com



**龚勇清**(1965—),男,江西进贤人,教授,1987年于山东大学获得学士学位,2004年于南昌航空大学获得硕士学位,主要从事光电信息与微光学元件制作方面的研究。E-mail: gongyongqing@126.com



**王星星**(1984—),男,江西南昌人,工程师,2008年,2011年于南昌航空大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉及光电检测技术方面的研究。E-mail: cimon1984@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)