

# 基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测

罗茂<sup>1,2</sup>, 步扬<sup>2</sup>, 徐静浩<sup>2</sup>, 王向朝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

**摘要** 为实现对光学元件表面疵病的精确测量和计数, 提出了一种基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测方法, 该方法采用不同波长的入射光源均匀照明光学元件表面, 通过暗场显微成像系统获得不同波长下的表面疵病图像。基于该方法研制了多光谱光学元件表面疵病检测系统, 获得了 365, 405, 436, 486, 550 nm 单波长光以及白光照明条件下光学样品表面疵病和标准样品图形的检测实验结果。实验结果表明, 相比传统的白光照明检测技术, 多光谱检测技术根据不同的材料性质选用不同波长的光作为入射光源, 可以明显提高系统对光学元件表面疵病的检测能力, 不仅可以提高测量精度, 而且可以获取白光照明下无法检测到的疵病信息。

**关键词** 测量; 疵病检测; 散射成像; 多光谱技术; 疵病数量; 检测精度

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0104001

## Optical Element Surface Defect Measurement Based on Multispectral Technique

Luo Mao<sup>1,2</sup>, Bu Yang<sup>2</sup>, Xu Jinghao<sup>2</sup>, Wang Xiangzhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** In order to measure optical element surface defects accurately, a method of optical element surface defect measurement based on the multispectral technique is presented. Incident light sources with different wavelengths are used to illuminate optical element surface uniformly, and defects images are captured by a dark field microscopic imaging system for every wavelength. The multispectral optical element surface defect measurement system is developed. The experiments to detect optical element surface defects and standard test samples are performed under illumination of light with different wavelengths (365, 405, 436, 486, and 550 nm) and white light. The experimental results show that compared with the traditional measurement technology with white light, significant improvement on the measurement performance of optical element surface defects is observed by using the multispectral measurement technique where the wavelength of incident light can be selected according to the material characteristic of tested object. Furthermore, the defect measurement accuracy is improved and many defects which cannot be detected with the traditional method are also obtained.

**Key words** measurement; defect measurement; scattering imaging; multispectral technique; defect number; measurement accuracy

**OCIS codes** 120.4630; 110.0180; 110.4190; 100.3008

## 1 引言

光学元件在加工过程中, 其表面不可避免地会出现划痕、麻点等疵病<sup>[1-2]</sup>。光学元件表面疵病所引起的散射将导致光学系统传输光束的能量减少和质量下降, 所引起的热效应和非线性效应将导致光学元件或其膜层受到破坏。特别是当激光通量提高到一定程度时, 光学元件表面疵病是造成光学元件激光损伤的主要

收稿日期: 2016-09-01; 收到修改稿日期: 2016-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61205102, 61275207, 61405210, 61474129)

作者简介: 罗茂(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: zju\_oelmm@zju.edu.cn

导师简介: 步扬(1973—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光学精密检测方面的研究。

E-mail: buyang@siom.ac.cn(通信联系人)

原因<sup>[3]</sup>。光学元件表面疵病的检测已成为精密光学元件质量检测中不可或缺的项目。

现有光学元件表面疵病检测法有目视法<sup>[4]</sup>、滤波成像法<sup>[5-8]</sup>、虚像叠加法<sup>[9]</sup>、暗场成像法<sup>[10-11]</sup>和频谱分析法<sup>[12]</sup>等,其中基于白光照明和传统光学显微成像术的暗场成像法是目前主要的表面疵病检测方法。该方法由于采用白光作为照明光源,不同波长、不同强度的表面散射光相互叠加,光学元件表面疵病细节信息容易被掩盖或者忽略,从而降低了表面疵病的检测质量,特别是当光学元件表面疵病尺寸达到微米、亚微米量级,检测精度提高到亚微米量级时,采用现有白光照明检测技术,已不能准确测量表面疵病尺寸和数量。本文提出采用多光谱技术<sup>[13]</sup>,使用不同波长的光入射到光学元件表面,利用疵病处理算法识别和分类所采集的图像信息,以实现高精度、可靠的疵病检测。

## 2 多光谱光学元件表面疵病检测系统

检测系统基于传统的光学显微暗场成像结构,如图 1 所示。光源发出的光经过光纤分光器后分成对称布局的四束平行光斜入射到待测光学元件表面,实现近似环形照明。系统采用三维纳米位移台实现测试样品的准确定位和对焦。待测样品表面散射光经过显微成像系统后,会聚到 CCD 面。通过计算机对 CCD 所获图像进行处理,获得光学元件表面疵病信息。与现有光学显微暗场成像结构不同,该系统在光路中设置不同的滤波片,实现多光谱成像。

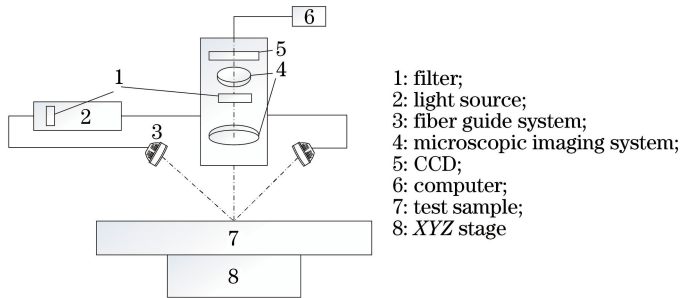


图 1 检测系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of measurement system

## 3 实验与分析

实验中待测光学元件样品为经过精密加工的钹玻璃平板。实验中光源的波长范围为 300~750 nm。根据光源光谱分布特性和钹玻璃的吸收光谱特性,选择使用波长为 365,405,436,486,550 nm 的单波长光和常规白光进行检测实验。显微物镜数值孔径为 0.28,不同波长所对应的系统分辨率分别为 0.80,0.88,0.95,1.06,1.20  $\mu\text{m}$ 。实验过程中,为了降低或消除光源本身不同波长强度差异所产生的测量误差,调整光源参数,使得在不同波长条件下 CCD 所接收的光强强度保持基本一致。

### 3.1 不同滤光片位置成像实验与分析

系统通过更换滤光片获取多光谱图像,滤光片放置位置成为首先要考虑的问题。系统有两个位置可以放置滤光片:一是放置在照明光路,使宽光谱光源发出的光通过滤光片后形成单一波长光;二是放置在 CCD 前成像光路,使得只有单一波长光可以成像。在图像采集过程中,仅改变滤光片位置,光源强度、CCD 积分时间和增益等参数均不改变,CCD 所采集的疵病图像总强度基本一致。

图 2 为波长为 436 nm 和 486 nm 时,不同滤光片位置采集的典型疵病图像,结果表明,当滤光片放置在光源后照明光路中,采集到的钹玻璃表面疵病图像的疵病细节清晰度和数量都优于滤光片放置在 CCD 前成像光路中所采集的疵病图像的疵病细节清晰度和数量。

为了直接显示滤光片在不同位置时的疵病图像差异,图 2 中未显示低于平均背景光强阈值的像素点。图 2(a)、(b)表明,波长  $\lambda=436\text{ nm}$ 、滤光片位于 CCD 前时,疵病图像中只显示 3 处较明显疵病信息,对应的光强度均不超过 60;当滤光片位于照明光路时,疵病图像中除显示 3 处较大疵病信息外,还显示有更多稍小的疵病信息,且 3 处较大疵病处的强度均接近 100,大于滤光片位于 CCD 前时疵病图像中的相应疵病处强

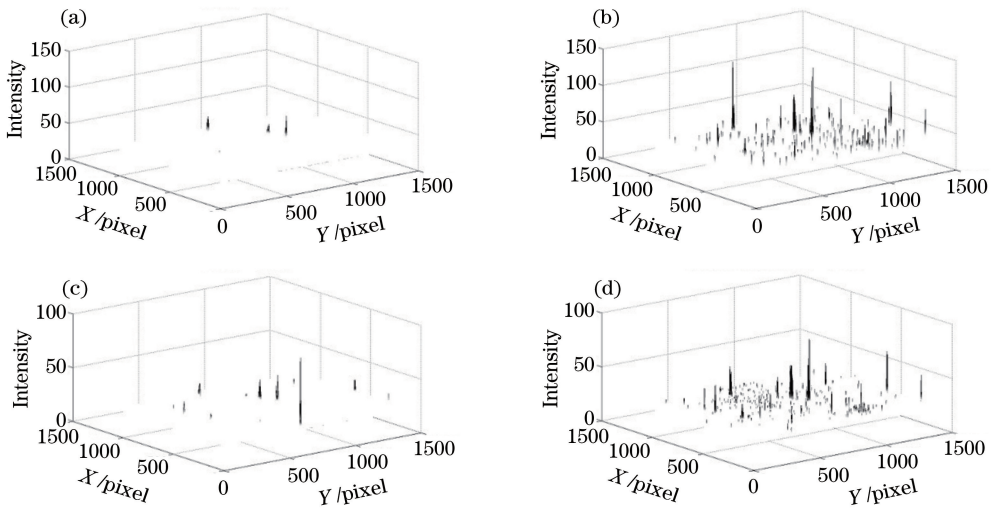


图 2 不同波长、不同滤光片位置时的疵病图像。(a) 波长为 436 nm, 滤光片位于 CCD 前成像光路; (b) 波长为 436 nm, 滤光片位于照明光路; (c) 波长为 486 nm, 滤光片位于 CCD 前成像光路; (d) 波长为 486 nm, 滤光片位于照明光路  
 Fig. 2 Defect images with different wavelengths and filter positions. (a) Wavelength is 436 nm and filter is in the imaging path in front of CCD; (b) wavelength is 436 nm and filter is in the illuminating path; (c) wavelength is 486 nm and filter is in the imaging path in front of CCD; (d) wavelength is 486 nm and filter is in the illuminating path

度。图 2(c)、(d)显示了相同的结果。

上述实验现象表明,当滤光片设置在照明光路中时,照射在光学元件表面的是单波长光,而将滤光片设置在 CCD 前成像光路时,照射在光学元件表面的光为白光,白光中不同波长和强度的光相互干扰,使表面疵病模糊或平均化,甚至使部分疵病无法识别。因此,当滤光片设置在照明光路时,采集的疵病图像细节清晰度和疵病数量均优于滤光片设置在成像光路中时采集的疵病图像的疵病细节清晰度和数量。后续实验中滤光片均放在照明光路中,可以更精确地统计疵病数量和分析疵病细节信息。

### 3.2 疵病数量检测实验与分析

在不同波长入射光下,对同一视场内某一区域的疵病数量进行定量分析。选择的疵病数量统计区域如图 3 所示。该特定区域的疵病数量统计结果如表 1 所示。不同波长入射光下具体的测量结果如图 4 所示。根据所采用的 CCD 像素尺寸、物镜放大倍数等参数,图中所识别的表面疵病尺度为 0.9~3.7 μm。

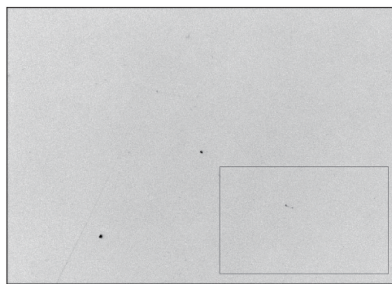


图 3 疵病数量统计区域

Fig. 3 Statistical area for defect number

表 1 不同波长光入射时同一区域疵病数量统计

Table 1 Defect statistics in the same area with different incidence wavelengths

Wavelength /nm	Number of defects
365	5
405	5
436	2
486	3
550	2
White light	2

由表 1 可知,波长为 365 nm 和 405 nm 的光入射时,检测到的疵病数量最多,均为 5 个。波长变长时,系统能检测到的疵病数量变少,仅为 2 个或 3 个。特别是采用传统白光照明时,系统能检测到的疵病数量只有 2 个,小于单波长 365 nm 和 405 nm 光入射时的测量结果。这表明,采用白光照明时,不同波长和强度的光同时照明,导致采集的图像疵病检测数量较少,且只能检测大疵病。对于较小的疵病,白光照明方式已经不能检测。进一步对比不同波长下疵病数量检测结果(图 4)。对于大的疵病缺陷,使用上述各个波长的光均可以检出[图 4(a)~(f)]。对于较小的疵病缺陷,由于材料、疵病的特性不同,其检测结果也不同。对比图 4(a)和图 4(b),入射波长分别为 365 nm 和 405 nm 时,检测到的疵病位置有差异,表明采用上述两个波长光照明,可以检测出不同的疵病。

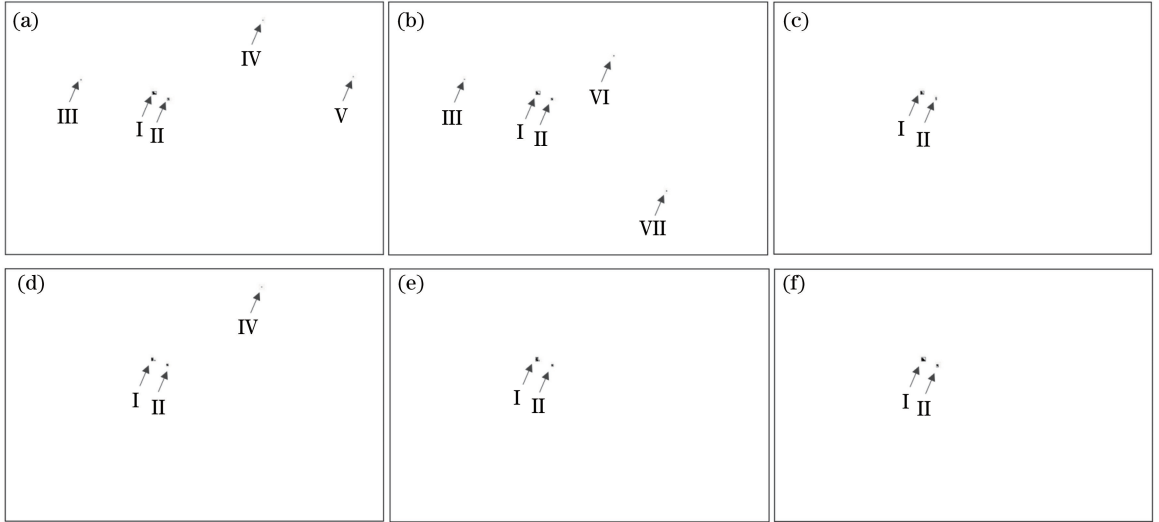


图 4 不同波长入射光下的疵病图像。(a)  $\lambda=365\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=436\text{ nm}$ ;  
(d)  $\lambda=486\text{ nm}$ ; (e)  $\lambda=550\text{ nm}$ ; (f) 白光

Fig. 4 Defect images with different incidence wavelengths. (a)  $\lambda=365\text{ nm}$ ; (b)  $\lambda=405\text{ nm}$ ; (c)  $\lambda=436\text{ nm}$ ;  
(d)  $\lambda=486\text{ nm}$ ; (e)  $\lambda=550\text{ nm}$ ; (f) white light

根据上述检测结果,采用多光谱技术,联合使用入射波长分别为 365 nm 和 405 nm 时的疵病测量结果,可以明显提高系统对疵病的检测数量。图 5 为图 4(a)和图 4(b)融合后的汇总图像,其疵病检测数量达到了 7 个,更准确地表征了该区域中的疵病信息。

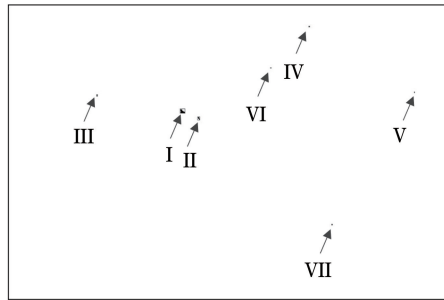


图 5 波长为 365 nm 和 405 nm 时的疵病检测图像融合后图像

Fig. 5 Image fused with defect images measured at 365 nm and 405 nm wavelengths

### 3.3 疵病精度检测实验与分析

典型的表面疵病形态为麻点和划痕。为实现准确分析,实验中分别使用 Thorlabs 标准分辨率板  $5\ \mu\text{m}$  圆孔、电子显微镜标定的激光孔和 Thorlabs 标准分辨率板 50 lp/mm 的光栅线对代表麻点和划痕。

#### 3.3.1 圆孔测量实验和分析

实验中入射光依然采用 365, 405, 436, 486, 550 nm 的单波长光和白光。待测样品为 Thorlabs 标准分辨率板上直径  $D_a$  为  $5\ \mu\text{m}$  的圆孔(图 6)。不同入射光下获取的  $5\ \mu\text{m}$  圆孔灰度图像三维显示如图 7 所示。

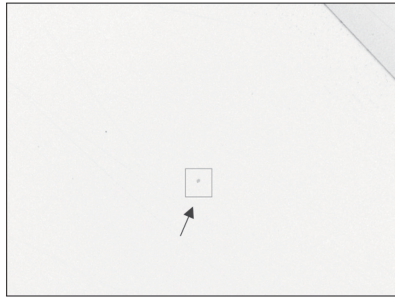


图 6 Thorlabs 标准分辨率板  $5\ \mu\text{m}$  圆孔

Fig. 6  $5\ \mu\text{m}$ -diameter pinhole in Thorlabs test target

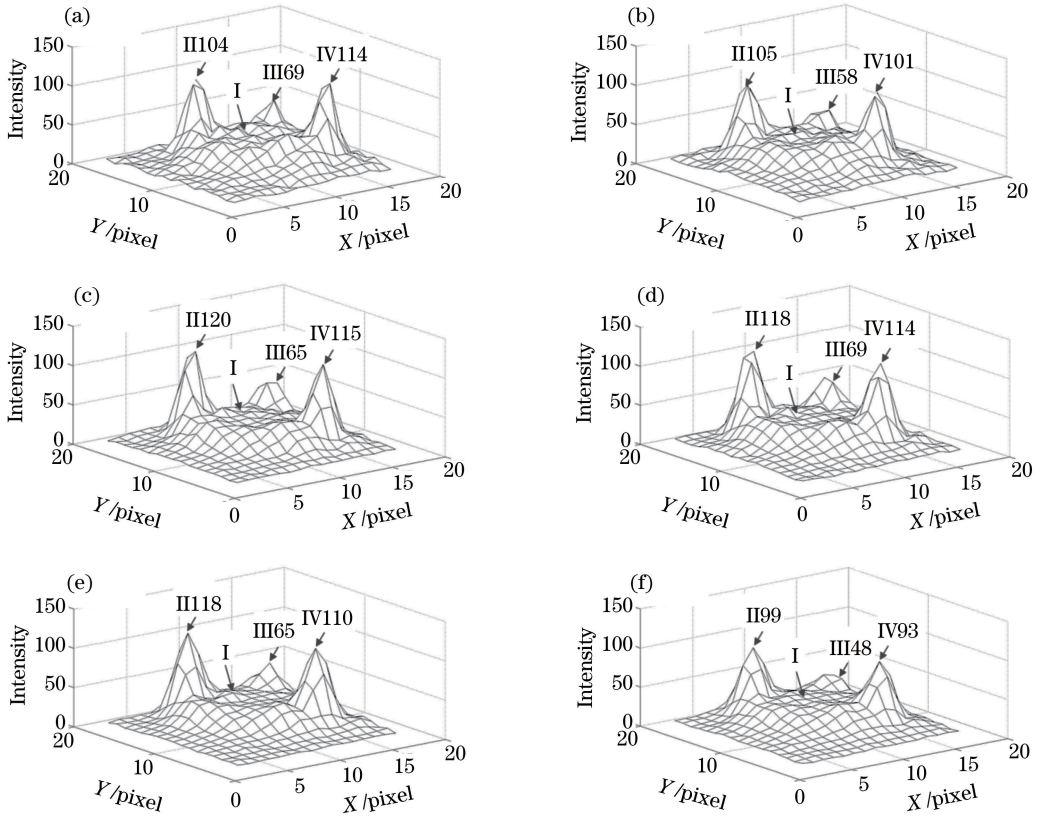


图 7 不同波长入射光下标准分辨率板  $5\ \mu\text{m}$  圆孔图像。(a)  $\lambda=365\ \text{nm}$ ; (b)  $\lambda=405\ \text{nm}$ ; (c)  $\lambda=436\ \text{nm}$ ;  
(d)  $\lambda=486\ \text{nm}$ ; (e)  $\lambda=550\ \text{nm}$ ; (f) 白光

Fig. 7 Images of  $5\ \mu\text{m}$ -diameter pinhole with different incidence wavelengths. (a)  $\lambda=365\ \text{nm}$ ; (b)  $\lambda=405\ \text{nm}$ ;  
(c)  $\lambda=436\ \text{nm}$ ; (d)  $\lambda=486\ \text{nm}$ ; (e)  $\lambda=550\ \text{nm}$ ; (f) white light

标准分辨率板  $5\ \mu\text{m}$  圆孔的三维灰度图像表征了不同波长入射光下获取的圆孔图像差异。入射光波长为  $365\ \text{nm}$ 、 $405\ \text{nm}$  时,图像中心区域 I 的强度起伏相较于其他波长更加明显。在入射光波长为  $550\ \text{nm}$  和白光照明下获取的图像中心区域已经变得平滑。 $365\ \text{nm}$ 、 $405\ \text{nm}$  波长光入射条件下获取的图像细节清晰。白光照明条件下,图像圆孔边缘的强度均小于其他单波长入射下的边缘强度。白光照明下,II 指向像素强度为 99,其他波长相应位置的强度均大于 100,其中  $436\ \text{nm}$  波长照射下的强度最大,为 120。白光照明下 III 指向像素强度为 48, $405\ \text{nm}$  波长照射下相应位置强度为 58,其他波长相应位置强度均大于 60,其中  $365\ \text{nm}$ 、 $486\ \text{nm}$  波长照射下的强度最大,为 69。白光照明下 IV 指向像素强度为 93,其他波长相应位置的强度均大于 100,其中  $436\ \text{nm}$  波长照射下的强度最大,为 115。白光照明下采集的圆孔图像强度低于其他单波长光照射下采集图像的强度。

对图 6 方框中的圆孔部分进行几何放大,如图 8 所示。放大之后的图像略有些模糊,但仍然可以识别为

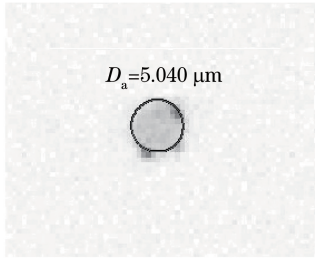


图 8 365 nm 波长入射光下标准分辨率板 5 μm 圆孔测量结果

Fig. 8 Measured result of 5 μm-diameter pinhole at wavelength of 365 nm

一个圆孔形结构。样品圆孔图像直径采用 Taubin 代数圆拟合算法<sup>[14]</sup>，不同波长入射光下圆孔检测计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知，入射光波长为 365 nm 时，标准差仅为 0.04 μm，相对于标准值的误差仅为 0.8%；入射光波长为 405 nm 时，标准差和相对误差稍大，为 0.11 μm 和 2.2%。入射光波长为 436 nm 时，标准差和相对误差最大，达到 0.32 μm 和 6.4%。采用白光照明时，标准差和相对误差为 0.15 μm 和 3.0%。365 nm 与 405 nm 波长照射下光学元件表面疵病测量误差均小于白光照明时的测量误差。实验与计算结果也表明，并不是波长越短，分辨率越高，测量误差越小。如表 2 所示，入射光波长为 436 nm 和 486 nm 时，测量误差最大，波长更长或者更短时，测量误差反而减小。

表 2 标准分辨率板 5 μm 圆孔测量数据统计

Table 2 Measured data of 5 μm-diameter pinhole in test target

Wavelength /nm	Diameter /μm	Standard error /μm	Relative error /%
365	5.040	0.04	0.8
405	4.890	0.11	2.2
436	4.680	0.32	6.4
486	4.760	0.24	4.8
550	4.820	0.18	3.6
White light	4.850	0.15	3.0

使用该系统进行多个激光孔的检测实验。测试对象为已用电子显微镜标定的直径为 4.950 μm 的激光孔阵列，如图 9 所示。由于视场中孔数量较多，仅选取其中一部分激光孔进行测量分析。在入射光波长为 365 nm 时，典型实验测量结果如图 10 所示。

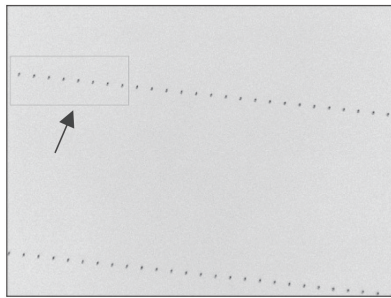


图 9 激光孔阵列图( $D_a = 4.950 \mu\text{m}$ )

Fig. 9 Laser holes with  $D_a = 4.950 \mu\text{m}$

选取测量对象中激光孔数量为 8，因此，采用 8 个孔测量结果的平均值作为某一波长入射光下的直径测量值，测量结果如表 3 所示。

由表 3 可知，入射光波长为 365 nm 时，标准差仅为 0.037 μm，相对于标准值的误差仅为 0.75%。入射光波长为 405 nm 时，标准差仅为 0.001 μm，相对于标准值的误差最小，仅为 0.02%。采用白光照明时，标准差和相对误差为 0.149 μm 和 3.01%。采用 365 nm、405 nm 波长作为照明光源，测量误差均小于白光照明时的直径测量误差。同时，结果也显示，采用 486 nm、550 nm 等单波长光和白光照明时，测量值相对标定值

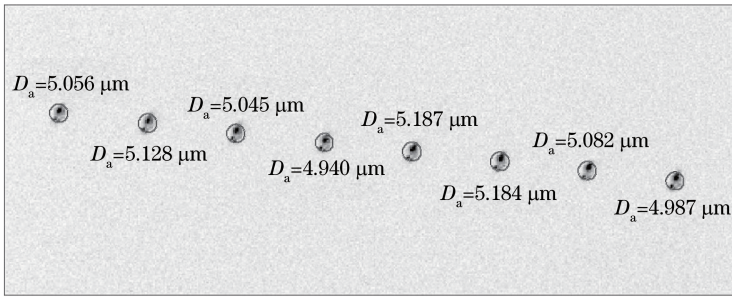


图 10 激光阵列孔尺寸测量结果

Fig. 10 Measured results of laser holes

偏小,标准差为负值,但相对误差大。当入射波长为 486 nm 和 550 nm 时,误差最大,测量标准差和相对误差均超过  $0.4 \mu\text{m}$  和 8%。因此,在多孔阵列测量过程中,采用 486 nm 和 550 nm 等单波长光和白光照明时,测量结果有可能会偏小,需要进行多种测试综合比对。

表 3 激光孔测量数据统计表

Table 3 Measured data of laser holes

Wavelength /nm	Diameter / $\mu\text{m}$	Standard error / $\mu\text{m}$	Relative error /%
365	4.987	0.037	0.75
405	4.951	0.001	0.02
436	4.976	0.026	0.53
486	4.534	-0.416	8.40
550	4.547	-0.403	8.14
White light	4.801	-0.149	3.01

### 3.3.2 直线对测量实验与分析

在相同的条件下对线形疵病进行实验与分析。测试样品为 Thorlabs 标准分辨率板上 50 lp/mm 的光栅线对(图 11),对应单一线对的宽度为  $20 \mu\text{m}$ 。在不同波长入射光条件下对图 11 方框所示部分进行检测,所采集的图像测量结果如图 12 所示。

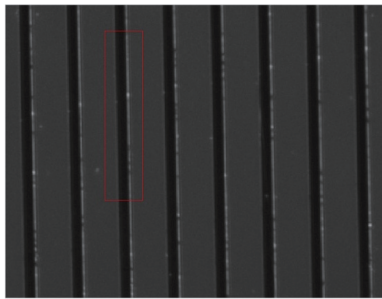


图 11 Thorlabs 标准分辨率板上 50 lp/mm 线对图形

Fig. 11 50 lp/mm line pair image in Thorlabs test target

对比图 12 所示的标准分辨率板 50 lp/mm 线对灰度图像的三维显示图,不同波长光照明条件下获取的 50 lp/mm 线对图像存在明显差异。486 nm、白光照明条件下 I 处的光强度小于 70,其他波长相应位置光强度均大于 70,其中 365 nm 波长照射下光强度最大,为 83。550 nm、白光照明条件下 II 处光强度较小,分别为 155、159。436 nm、486 nm 波长照射下图像相应位置光强度分别为 199、175。365 nm、405 nm 波长照射下图像相应位置光强度均大于 200,其中 365 nm 波长对应的图像 II 处光强度最大,为 236。使用 365 nm、405 nm 波长光照射下获取的图像强度较大,对比明显,图像细节清晰。白光照明条件下采集的图像强度较小,对比度差,图像细节信息较模糊。

365 nm 波长均匀照明条件下线对测量结果如图 13 所示。由于所选取的测试图像中有 8 条亮线,为减小实验误差,计算时每间隔 4 个线对计算相应两条线的距离,最后取算术平均作值作为测量结果。实验中采用 Canny 边缘检测算法<sup>[15]</sup>和霍夫变换<sup>[16]</sup>提取相应线条边界。不同波长下线对宽度测量结果如表 4 所示。

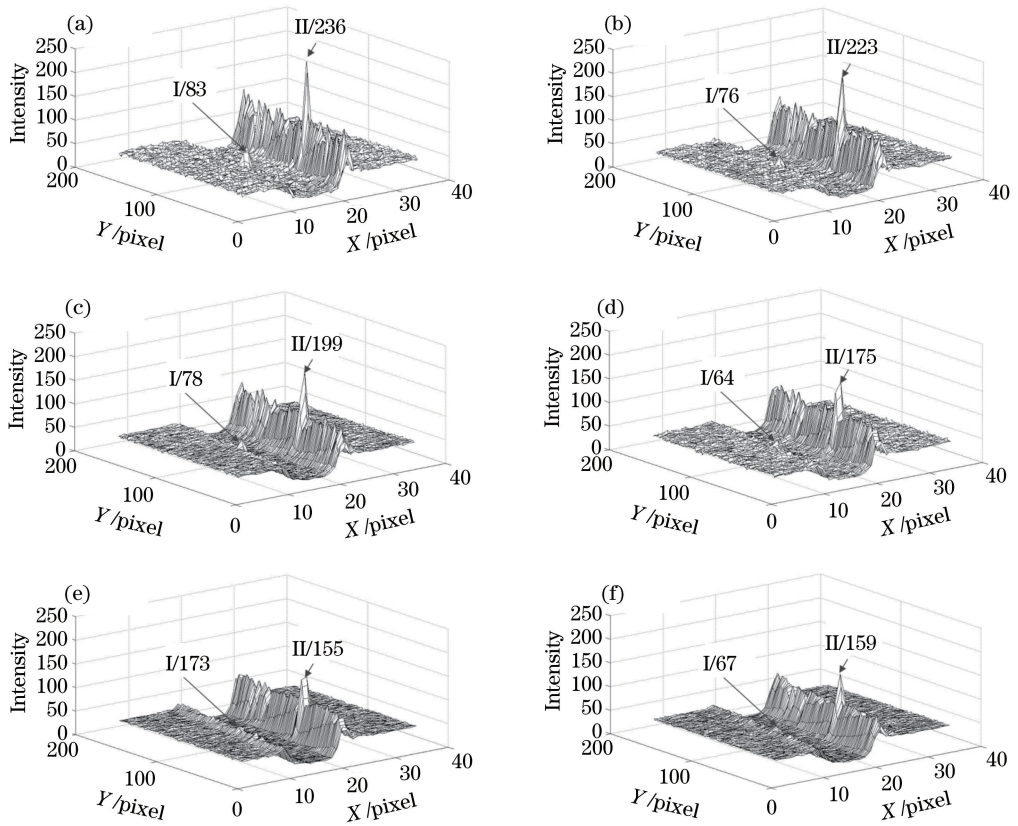


图 12 不同波长入射光下 50 lp/mm 线对检测结果。(a)  $\lambda=365$  nm; (b)  $\lambda=405$  nm; (c)  $\lambda=436$  nm; (d)  $\lambda=486$  nm; (e)  $\lambda=550$  nm; (f) 白光

Fig. 12 50 lp/mm line pair images with different incidence wavelengths. (a)  $\lambda=365$  nm; (b)  $\lambda=405$  nm; (c)  $\lambda=436$  nm; (d)  $\lambda=486$  nm; (e)  $\lambda=550$  nm; (f) white light

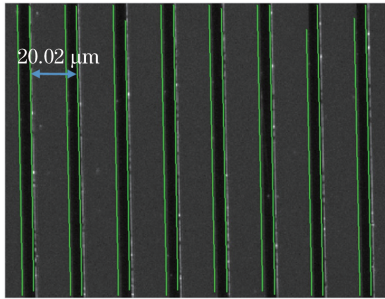


图 13 365 nm 入射光下 50 lp/mm 线对测量结果

Fig. 13 Measured result of 50 lp/mm line pair at wavelength of 365 nm

表 4 标准分辨率板 50 lp/mm 线对宽度测量数据

Table 4 Measured data of 50 lp/mm line pairs in test target

Wavelength /nm	Width / $\mu\text{m}$	Standard error / $\mu\text{m}$	Relative error /%
365	20.02	0.02	0.10
405	20.05	0.05	0.25
436	20.08	0.08	0.40
486	20.11	0.11	0.55
550	20.08	0.08	0.40
White light	20.05	0.05	0.25

由表 4 可知,365 nm 波长照射下线对宽度测量精度最高,标准差为 0.02  $\mu\text{m}$ ,相对误差仅为 0.1%;入射波长为 405 nm 时线宽测量值与白光照明下的结果相同,标准差均为 0.05  $\mu\text{m}$ ,相对误差为 0.25%。当入射



波长为 486 nm 时,线对宽度测量误差最大,标准差为 0.11  $\mu\text{m}$ ,相对误差为 0.55%。当入射光的波长更大或更小时,测量相对误差会减小,同样表明并不是入射波长越短,测量精度越高。

综合分析疵病数量检测和疵病精度检测结果可以发现,使用 365 nm 和 405 nm 双波长对疵病进行检测,不仅可以检测出白光无法获取的疵病信息,并且疵病尺寸检测精度也高于白光照明下的检测精度。说明传统的白光照明产生的不同波长和强度的反射光相互干扰,导致部分疵病细节模糊,甚至无法检测。

## 4 结 论

光学元件表面疵病影响光学元器件及光学系统性能。对于精密光学元件,表面疵病成为性能检测的重要内容。提出了一种基于多光谱技术的光学元件表面疵病检测方法,该方法采用不同波长的入射光源均匀照明光学元件表面以获取不同的表面疵病图像。基于该方法搭建了一套多光谱光学元件表面疵病检测系统,获得了波长为 365,405,436,486,550 nm 的单一波长光以及白光照明条件下表面疵病的检测实验结果。分析表明,当光源波长为 365 nm 和 405 nm 时,系统可检测到的疵病数量多,不仅可以检测到其他波长光和白光照明无法检测到的疵病,而且可以相互补充,检测两个波长各自无法检测到的疵病。采用 365 nm 和 405 nm 双波长检测,将检测结果图像融合,可以检测到的疵病数量最多。利用该系统分别对标准分辨率 5  $\mu\text{m}$  圆孔、电子显微镜已标定的激光孔阵列以及标准分辨率板 50 lp/mm 线对进行检测。实验结果表明,对于单点或者线条,当光源波长为 365 nm 和 405 nm 时,系统获取的图像对比明显,细节信息清晰。计算结果也表明,当光源波长为 365 nm 和 405 nm 时,点或者线条的尺寸测量精度高,测量标准差和相对误差较小。相比采用白光作为照明光源的传统显微暗场成像检测技术,提出的多光谱检测技术采用不同波长的入射光源,可以明显提高系统对疵病的检测能力。对钎玻璃表面疵病检测时,采用 365 nm 和 405 nm 双波长光源,相比传统白光照明,不仅可以提高表面疵病测量精度,而且可以获取白光照明下无法检测到的疵病。

## 参 考 文 献

- [1] International Organization for Standardization. Optics and photonics-preparation of drawings for optical elements and systems. Part 7: Surface imperfection tolerances: ISO 10110-7[S]. 2008.
- [2] Surface defects of optical elements: GB/T 1185—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.  
光学零件表面疵病: GB/T 1185—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] Bercegol H, Bouchut P R, Lamaignère L, *et al.* The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers[C]. SPIE, 2004, 5273: 312-324.
- [4] Dai Mingkui, Xu Deyan. The present situation of imperfections testing and researching on the optical elements[J]. Optical Instruments, 1996, 18(3): 33-36.  
戴名奎, 徐德衍. 光学元件的疵病检验与研究现状[J]. 光学仪器, 1996, 18(3): 33-36.
- [5] Baker L R. Microscope image comparator[J]. Journal of Modern Optics, 1984, 31(6): 611-614.
- [6] Baker L R. Inspection of surface flaws by comparator microscopy[J]. Applied Optics, 1988, 27(22): 4620-4625.
- [7] Baker L R. On-machine measurement of roughness, waviness, and flaws[C]. SPIE, 1990, 1333: 248-256.
- [8] Liberati F. Measure of surface and bulk defects in any transmitting or reflecting optical component[C]. SPIE, 1993, 1781: 170-174.
- [9] Buchtel M E. A virtual image superposing comparator[C]. SPIE, 1993, 1821: 130-151.
- [10] Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao, *et al.* Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038.  
杨甬英, 陆春华, 梁 蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.
- [11] Liu D, Wang S, Cao P, *et al.* Dark-field microscopic image stitching method for surface defects evaluation of large fine optics[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5974-5987.
- [12] Zhang Xiao, Yang Guoguang, Cheng Shangyi, *et al.* Laser frequency spectrum analysis method and automatic inspection instrument of optical surface imperfection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1994, 15(4): 396-399.  
张 晓, 杨国光, 程上彝, 等. 光学表面疵病的激光频谱分析法及其自动检测仪[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(4):

396-399.

- [13] Vagni F. Survey of hyperspectral and multispectral imaging technologies [R]. North Atlantic Treaty Organization, 2007: TR-SET-065-P3.
- [14] Taubin G. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1991, 13(11): 1115-1138.
- [15] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6): 679-698.
- [16] Hough PV C. Method and means for recognizing complex patterns: US3069654A[P]. 1962-12-18.