

# 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究

王世通 杨甬英 赵丽敏 柴惠婷 刘 东 白 剑 沈亦兵

浙江大学光电系现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 对于精密光学元件表面微米亚微米量级的表面缺陷,光在缺陷处会产生强烈的衍射和散射效应,其在像面的分布情况不能简单地使用几何光学进行解释。采用时域有限差分方法(FDTD)建立了光学元件截面为三角形、矩形的表面缺陷的电磁理论模型,模拟仿真得到了缺陷附近区域及像面的散射光分布情况。并使用电子束曝光、反应离子束刻蚀工艺制作了矩形截面的缺陷样本板,对样本缺陷进行了散射成像实验,得到了暗场图像的灰度分布情况,并与理论仿真结果进行了比对。实验中得到的表面缺陷的像面光强分布情况与理论模拟基本吻合,为光学元件的加工制造和缺陷检测的尺度标定提供了理论依据和参考。

**关键词** 测量;表面光学;散射;表面缺陷;时域有限差分法

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0708005

## Numerical Simulation Research on Scattering Light Imaging of Surface Defects of Optical Components

Wang Shitong Yang Yongying Zhao Limin Chai Huiting Liu Dong Bai Jian Shen Yibing

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Strong diffraction and scattering effects can be caused by micro or sub-micro scaled surface defects of optical components. The distribution of scattering light on the image plane can not be explained simply by geometrical optical theories. The electromagnetic model of triangle-shaped and rectangular surface defects is built by using finite difference time domain (FDTD) method. The distributions of scattering light in the near-field region and on the image plane are simulated. The scattering imaging experiment of sample defects is also performed. The sample defects are rectangular and fabricated by electron beam exposure and ion beam etching. The gray distributions in dark-field images are compared with intensity distribution of scattering light on the image plane and show a good consistency. The results provide significant theoretical references for defect calibration in optical manufacturing and testing.

**Key words** measurement; surface optics; scattering; surface defects; finite-difference time-domain method

**OCIS codes** 120.4630; 120.5820; 240.6645; 290.5820

### 1 引 言

在空间光学、惯性约束核聚变、高功率激光、微光学、极紫外光刻、超大规模集成电路等光学前沿和电子工业领域,对高表面质量的超光滑光学元件存在着广泛的需求。这些光学元件的表面质量既包括描述表面形貌起伏程度的面形误差、波纹度和粗糙度等,也包括宏观表面上随机分布、离散的划痕、麻点等各类缺陷。缺陷存在的主要危害是造成散射、能量吸收、有害的耀斑、衍射花纹、膜层破坏、激光损伤等,进而影响系统的性能和正常运行;在一些高功率激光应用场合甚至会造成光学元件因局部能量非均匀分布而发生爆

收稿日期: 2015-02-03; 收到修改稿日期: 2015-03-20

**基金项目:** 国家自然科学基金(11275172、61475141)、现代光学仪器国家重点实验室资助项目(MOI2015B06)、航空科学基金(20140376001)

**作者简介:** 王世通(1988—),男,博士研究生,主要从事表面缺陷检测、图像处理等方面的研究。

E-mail: photonkristall@gmail.com

**导师简介:** 杨甬英(1954—),女,博士,教授,主要从事精密测试与计量技术、光电信息传感与纳米技术、气动光学及瞬态波前检测等方面的研究。E-mail: chuyyy@zju.edu.cn(通信联系人)

炸,造成人员伤亡<sup>[1-4]</sup>。然而光学行业长期以来普遍采用主观性强、不确定性大、易产生歧义、效率低的人工目视比对法对表面缺陷进行质量控制,因此,迫切需要建立光学元件表面缺陷自动化、数字化、标准化检测及评价系统。

由于表面缺陷是在宏观表面上随机分布的、离散的几何特征,种类繁多,横向尺度从亚微米至亚毫米不等,表面缺陷检测要求对整个宏观表面上每个孤立点进行检测,分辨力达亚微米量级。使用干涉法检测,条纹会在缺陷处断裂,且难以解调;原子力显微镜虽然检测精度可以达到纳米量级,但是检测物方视场过小,点扫描方式检测效率低,不适于宏观全表面检测<sup>[5]</sup>。浙江大学研制了基于显微散射暗场成像原理的超光滑表面缺陷数字化评价系统(SDES),能够实现对最大尺寸为800 mm×600 mm的超光滑表面上的缺陷进行定位、成像、分类、定量、分级等全自动数字化评价<sup>[6-11]</sup>。显微散射暗场成像是利用表面缺陷对入射光进行调制形成散射光,使用显微镜对散射光进行暗场成像,进而获得表面缺陷信息并进行分析。但由于表面缺陷与光相互作用的复杂性,对于近微米、亚微米尺度的缺陷,显微散射暗场成像与几何成像效果差异较大,需要对表面缺陷对散射光的调制进行研究,进一步分析表面缺陷的散射特性以及散射暗场成像规律,完善检测的科学可靠性,为表面缺陷检测的标准化奠定理论基础。

时域有限差分(FDTD)<sup>[12-13]</sup>方法对电场分量和磁场分量在空间和时间上交替离散抽样,将麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,以求解出空间电磁场分布,在分析复杂目标、复杂介质和复杂环境中电磁波散射特性方面优势显著。本文采用时域有限差分方法,结合仿真软件,建立了不同截面形状的表面缺陷的几何-电磁模型,对显微散射暗场成像方法检测超光滑光学元件表面缺陷进行了仿真研究和数值计算,以分析缺陷特征与电磁场分布情况的关系。同时,使用电子束曝光、反应离子束刻蚀工艺制作了缺陷标准板,与部分理论计算结果进行比对分析。提出利用光学散射理论对表面缺陷的散射成像特性进行研究,为基于显微散射暗场成像原理的表面缺陷检测提供理论指导,并为表面缺陷检测标准的建立奠定理论基础。

## 2 系统显微散射暗场成像原理

显微散射暗场成像原理利用了光滑表面缺陷对入射光的调制产生的散射效应<sup>[6]</sup>。如图1所示,多束高亮度白光发光二极管(LED)光源形成环形布局,以特定角度倾斜入射到被检超光滑表面,显微镜只收集包含缺陷信息的散射光并最终在CCD传感器上形成由暗背景和亮特征构成的暗场图像。暗场条件下,能够检测出的最小缺陷的尺寸要远小于同一系统在明场条件下可分辨的缺陷的尺寸<sup>[14]</sup>。

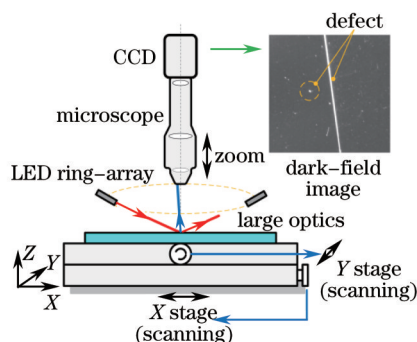


图1 显微散射暗场成像系统原理图

Fig.1 Principle of microscopic scattering dark-field imaging

每束LED照明光源发出的平行光会形成照度均匀的照明区域,环形布局设计对任意方向的缺陷实现无盲点照明。照明光源与成像系统形成的入射角度 $\alpha(0^\circ \leq \alpha < 90^\circ)$ 是一个重要的参数,光源最佳入射角度设为 $\alpha_0$ ,如图2所示。如果 $\alpha < \alpha_0$ ,反射光会进入系统参与成像,无法与缺陷产生的散射光分离,不能构成暗场成像条件,如图2(a)所示。此外,入射角过小也会为光源与显微镜的布局设计增加难度。而当 $\alpha > \alpha_0$ ,显微镜收集的散射光减少,散射光强度随着入射角度增大而逐渐减弱,造成成像质量下降,如图2(b)所示。通过对光源入射角度进行精确的控制,显微散射暗场成像光学系统能够实现超光滑表面缺陷的超分辨检测,通过这种方式获得的图像对比度较高,非常适合后续图像处理与缺陷特征分析。

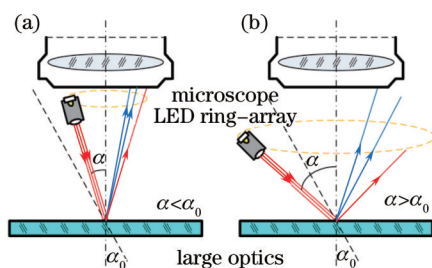


图2 系统LED光源入射角度 $\alpha$ 优选示意图。(a)  $\alpha < \alpha_0$ ; (b)  $\alpha > \alpha_0$   
 Fig.2 Illustration of incident angle  $\alpha$  of LED sources. (a)  $\alpha < \alpha_0$ ; (b)  $\alpha > \alpha_0$

### 3 光学元件表面散射的几何-电磁模型构建

仿照上文中的系统检测原理和硬件布局,采用FDTD方法建立了光学元件表面缺陷散射模型,如图3所示。散射仿真中,从外到内将计算区域划分为吸收边界、散射场区、总场区。光学元件表面缺陷的尺寸从0.1~100  $\mu\text{m}$ 量级不等,而光学元件的直径可以达到10~100 mm量级,因此,相对于微米及亚微米量级的缺陷,光学元件表面可视为无限大区域。仿真中使用有限大小FDTD计算区域对无限大表面缺陷的散射特性进行模拟,要求选取合适的边界条件。FDTD方法中常用的边界条件有Mur吸收边界条件和完全匹配层(PML)边界条件。Mur吸收边界条件无法完全抑制反射波;而PML边界条件通过在FDTD区域截断边界处设置特殊有耗介质层,该层截止的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配,能够保证入射波在分界面不产生反射波并迅速衰减,对入射波的吸收效果远优于Mur吸收边界条件。因此,这里在散射仿真区域边界设置PML吸收边界条件(黑色矩形)。

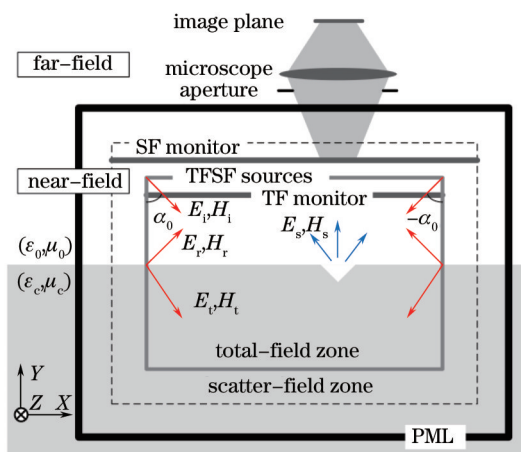


图3 光学元件表面缺陷二维电磁仿真模型图

Fig.3 2D electromagnetic simulation model of surface defect of optics

近场由总场区和散射场区共同构成,对近场数据进行外推,可以得到远场的电磁场空间分布以及成像情况。激励源和监视器分别是引入能量和记录能量的机制。建模时在总场和散射场边界处设置总场-散射场激励源(TFSF,图3中用灰色矩形示意),对计算区域进行划分。结合显微散射暗场成像原理,两个TFSF源分别以入射角 $\alpha_0$ 和 $-\alpha_0$ 对称入射到元件表面及缺陷。没有缺陷的光滑表面处将发生反射和透射,缺陷处除了发生反射和透射,还将发生散射。在总场区域上半空间设置总场(TF)监视器,记录的电磁场是入射场、反射场和散射场叠加的总场;在散射场上半空间设置散射场(SF)监视器,只记录散射场。图中 $E_i$ 、 $E_r$ 、 $E_t$ 、 $E_s$ 分别表示入射电场、反射电场、透射电场、散射电场,磁场的表示与电场表示类同。由于TF monitor只记录上半空间总场,有

$$\begin{cases} E = E_i + E_r + E_s \\ H = H_i + H_r + H_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 $E$ 、 $H$ 分别表示总电场和总磁场。在对散射场 $E_s$ 进行分离时,需要在总场 $E$ 中将入射场 $E_i$ 和反射场

$E_r$  减去。

在总场区建立光学元件及表面缺陷结构模型。元件表面以上空间的电容率为  $\epsilon_0$ , 磁导率为  $\mu_0$ , 元件内部的电容率为  $\epsilon_c$ , 磁导率为  $\mu_c$ 。在二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )基底上构建不同截面形状的缺陷。光学加工中常见划痕的截面形状近似为三角形<sup>[15]</sup>。为了模拟和标定实际缺陷, SDES 中采用电子束曝光、反应离子束刻蚀制作了尺寸由窄到宽逐渐变化的缺陷标准板。由于精确宽度和深度的三角形缺陷加工复杂且难以控制, 于是系统缺陷标准板上使用与三角形缺陷尺寸相对应的矩形缺陷对三角形缺陷进行模拟。因此, 仿真中对矩形和三角形两种截面形状的缺陷进行了研究, 其简化模型如图 4 所示。缺陷的宽度定义为  $w$ , 为缺陷低于光滑表面基准线高度区域的宽度在  $X$  方向上投影的距离; 缺陷的深度定义为  $d$ , 为缺陷最低处到光滑表面基准线的垂直距离在  $Y$  方向上投影的距离。定义深宽比(DWR)为  $D_{\text{WR}} = d/w$ , 为缺陷深度  $d$  和宽度  $w$  的比值。

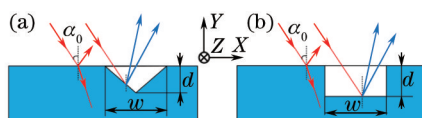


图 4 不同形状截面的缺陷模型简单示意图。(a) 三角形; (b) 矩形

Fig.4 Simplified model of surface defects. (a) Triangle-shaped; (b) rectangle-shaped

完成建模后, 使用 FDTD 方法进行电磁求解。总场监视器和散射场监视器上得到的分别是总场和散射场近场振幅和相位的分布情况。近场模拟数值是远场分析和成像分析的基础。对近场分布进行远场外推可以得到散射光的远场分布, 即二维光学元件表面以上, 光强在半空间角  $\theta$  ( $-90^\circ \sim 90^\circ$ ) 的空间分布情况。如果要得到散射光经过显微镜在 CCD 传感器上的成像情况, 还需要对近场数值做进一步处理。根据傅里叶光学相关知识, 显微成像是衍射受限成像系统, 物体经过衍射受限系统成像可看作进行了傅里叶变换。因此, 对散射场近场数值进行外推和傅里叶变换可以得到缺陷在远场像面的电磁场分布情况<sup>[16-17]</sup>。

## 4 仿真实验

通过以上分析, 结合显微散射暗场成像原理和系统硬件布局, 选取  $\alpha_0 = 30^\circ$ 。由于系统使用 LED 白光光源, 则将光源波长取 400~750 nm 的宽光谱范围。模拟中从起始波长到截止波长每隔 10 nm 对散射模型进行依次计算, 由于各波长之间的干涉效应可以忽略, 所以将光谱范围内 36 个单波波长条件下计算得到的散射场按照 LED 光谱曲线各波长对应的权重加权求和, 可以得到白光宽光谱仿真数值结果。

### 4.1 三角形截面缺陷散射光场分布

首先研究了光学加工中最典型的三角形截面缺陷。这类缺陷横向尺寸范围从亚微米到数十微米不等; 但根据 Bennett 等<sup>[18]</sup>使用接触式表面轮廓仪对三角形截面划痕的形貌的测量结果, 不同宽度三角形缺陷截面的深度与宽度的比值恒定, 一般保持在 8%~10% 之间。因此, 在对缺陷尺寸进行仿真时, 设置三角形缺陷的深度  $d$  和缺陷宽度  $w$  的比值  $D_{\text{WR}} = 10\%$ 。实验模拟中对多组不同尺寸规格的缺陷进行了研究, 其中最小缺陷宽度为 0.5  $\mu\text{m}$ , 其余宽度设置在 1~8  $\mu\text{m}$ , 间隔 1  $\mu\text{m}$  取值。

各缺陷的散射成像光强分布结果如图 5 所示。较窄的三角形截面缺陷 ( $w = 0.5, 1, 2 \mu\text{m}$ ,  $D_{\text{WR}} = 10\%$ ) 的散射光强度分布为单峰形, 衍射效应非常明显。当缺陷宽度增加到  $w = 3 \mu\text{m}$ , 缺陷的散射光强分布不完全是相对平滑的变化过程, 从中心到边缘逐渐下降的过程中出现了一些轻微的起伏。随着缺陷尺寸进一步增加 ( $w = 4, 5, 6, 7, 8 \mu\text{m}$ ,  $D_{\text{WR}} = 10\%$ ), 在光强中心较高主峰的左右分别对称地出现一个一级副峰, 两个副峰相对于中心主峰光强较弱, 但随缺陷尺寸增大而逐渐增强。各分图中竖直线标示出的是每种尺寸缺陷的理论宽度位置。三角形缺陷在像面的光强分布在  $x$  方向上的投影宽度要略大于理论宽度, 这是因为散射会造成缺陷在像面产生边缘弥散和模糊。在对暗场图像进行处理时, 直接应用边缘算子计算得出的是像面光强分布的投影宽度, 这与缺陷的真实宽度存在一定差异。三角形缺陷的光强分布多为单峰形或山字形, 使用阈值法计算宽度较为适宜, 在下文中会作进一步研究与分析。



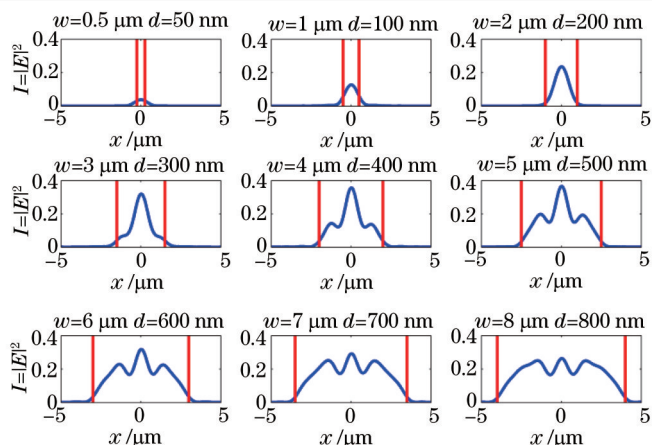


图5 深宽比0.1的三角形截面缺陷远场像面光强分布

Fig.5 Light intensity distribution of triangle-shaped defects (depth-width ratio is 0.1) on the image plane

#### 4.2 矩形截面缺陷散射光场分布

标准板上设置的缺陷样本深度相同、宽度按照设计值从窄到宽逐渐变化。为了研究与分析缺陷标准板的散射光强度分布情况,同时对截面为矩形的表面缺陷进行了建模。对两种深度的缺陷进行了研究,  $d$  取 300 nm 和 25 nm 两个值。这是因为实际情况中多数缺陷的深度在 200~400 nm 之间;但也存在一些深度较浅的线形缺陷,或称为亮路、亮线,其深度在 25 nm 上下。仿真中每个深度值的缺陷,宽度  $w$  取 0.5、1、2、3、4、5  $\mu\text{m}$ 。以上缺陷尺寸的设置与标准板缺陷的尺寸设计加工值一致。

深度  $d = 300 \text{ nm}$  的矩形截面缺陷远场像面散射光强度分布情况如图 6 所示,每幅分图中竖直线标示出的是每种尺寸缺陷的理论宽度位置。从图 6 中可以看出,宽度较窄的矩形截面缺陷 ( $w = 0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$ ,  $d = 300 \text{ nm}$ ) 的散射光强度分布为单峰形,衍射效应非常明显。特别是宽度  $w = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $d = 300 \text{ nm}$  的缺陷,其散射光强明显超过了其他尺寸的缺陷,该特性将在惯性约束聚变系统中产生较大的危害。但是,宽度较窄缺陷的散射光强度分布形态与其尺寸之间无法得到直接的对应关系。随着缺陷尺寸的增加 ( $w = 2、3、4、5 \mu\text{m}$ ,  $d = 300 \text{ nm}$ ),其散射光强度分布呈双峰形,表示缺陷理想宽度的两条竖直线位于两个峰形的极大值附近位置。宽度  $w \geq 2 \mu\text{m}$  的矩形缺陷在像面的散射光强分布情况与几何光学类似。

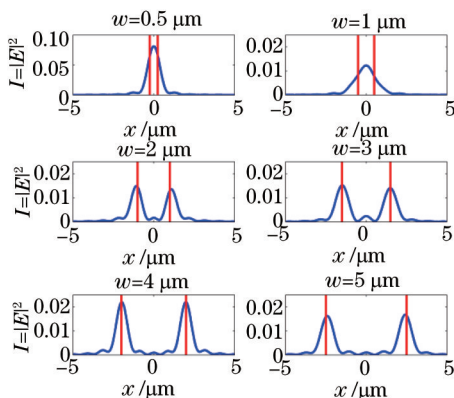


图6 深度 300 nm 矩形截面缺陷远场像面散射光强分布

Fig.6 Light intensity distribution of rectangle-shaped defects (depth: 300 nm) on image plane

对深度  $d = 25 \text{ nm}$  的矩形截面缺陷进行了类似的研究与分析,其仿真结果如图 7 所示。可以看出,深度  $d = 25 \text{ nm}$  的矩形截面缺陷的散射光强度分布形态与深度  $d = 300 \text{ nm}$  的矩形截面缺陷相似,同样是  $w \leq 1 \mu\text{m}$  时为衍射效应的单峰,  $w \geq 2 \mu\text{m}$  时呈双峰分布,缺陷实际宽度位置基本位于双峰极大值位置附近。但是,在散射光强度上,深度  $d = 25 \text{ nm}$  缺陷的光强要比深度  $d = 300 \text{ nm}$  的缺陷弱得多,其散射光强度大概为同宽度深度为  $d = 300 \text{ nm}$  的缺陷光强的 20%~50%。由于散射光强较弱,这类缺陷非常容易被肉眼漏检。

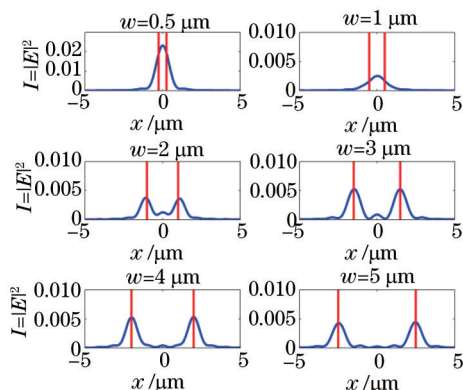


图 7 深度 25 nm 矩形截面缺陷远场像面散射光强分布

Fig.7 Light intensity distribution of rectangle-shaped defects (depth: 25 nm) on image plane

### 4.3 系统实验验证与分析

使用 SDES 对标准板上的缺陷样本进行采集,得到标准板的散射暗场图像,与理论仿真结果进行比对。SDES 中选用的是科学级 CCD 相机,CCD 上图像像素的灰度与接收的散射光强呈正比。因此可以利用散射暗场图像灰度分布对理论仿真得到的散射成像光强分布进行比对与验证。实验中使用的缺陷标准板表面的缺陷样本截面均为矩形,深度一致 ( $d = 300 \text{ nm}$ ),缺陷宽度为从左到右逐渐加宽,依次为  $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \sim 40 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m}$  间隔)。SDES 采集定标板的暗场图像如图 8 所示。

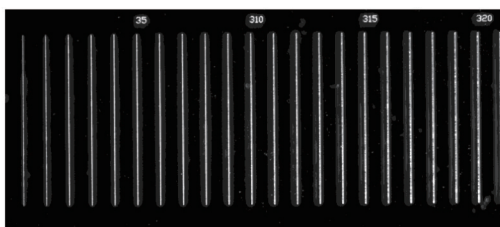


图 8 标准板上的一组缺陷样本的暗场图像

Fig.8 Dark-field image of a set of sample defects on standard board

分割出各宽度缺陷的局部图像,取垂直于缺陷长度方向直线的灰度数据,分析该直线方向上(即缺陷剖面方向)的灰度变化情况,结果如图 9 所示。其中图 9(a1)、(b1)、(c1)、(d1)、(e1)、(f1)分别为宽度  $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \sim 5 \mu\text{m}$  缺陷样本暗场灰度图像;图 9(a2)、(b2)、(c2)、(d2)、(e2)、(f2)分别为相应宽度缺陷图像中虚线位置的灰度剖面分布图,其中粗实线是灰度分布曲线,而细实线是图 6 中理论仿真结果换算到像素坐标系下的光强分布曲线,竖直线表示缺陷理论宽度位置。由于衍射极限的存在,一个理想点经过光学系统成像后不再是一个理想的点,而是一个弥散斑,因此,图 9 中的灰度分布曲线相对于仿真得到的光强分布曲线都有不同程度的展宽,但分布情况基本一致。宽度较窄的缺陷 ( $w = 0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$ ) 的衍射效应比较强,其灰度分布图呈单峰形,灰度级也相对较高。理论仿真中,光强分布从  $w = 2 \mu\text{m}$  开始出现双峰形分布,而由于衍射弥散效应,实验得到的  $w = 2 \mu\text{m}$  的灰度隐约出现双峰,但双峰并没有完全分开。缺陷图像的灰度分布曲线从  $w = 3 \mu\text{m}$  开始出现双峰分布情况,两个峰极大值基本位于理论宽度位置处,与理论仿真结果基本一致。

对于双峰分布的缺陷,将理论仿真得到的光强分布双峰之间的距离作为缺陷的仿真宽度  $w_{\text{FITD}}$ ,将图像灰度分布双峰之间的距离作为缺陷的图像宽度  $w_{\text{image}}$ 。仿真宽度  $w_{\text{FITD}}$  可以直接通过仿真光强曲线双峰值对应的横坐标之差获得。为了得到亚像素精度的缺陷图像宽度  $w_{\text{image}}$ ,首先将离散的像素-灰度数据拟合成连续曲线。光学系统的点扩展函数是贝塞尔型的,可以用高斯函数对点扩展函数进行简化<sup>[19-20]</sup>。采用对称的双高斯项叠加的双高斯函数对缺陷灰度分布曲线进行非线性曲线拟合,双高斯函数为

$$g(p) = a \exp\left[-\frac{(p - b_1)^2}{c^2}\right] + a \exp\left[-\frac{(p - b_2)^2}{c^2}\right] + g_0, \quad (2)$$

式中  $p$  表示像素,  $g(p)$  表示图像灰度,  $g_0$  表示背景灰度,  $b_1$ ,  $b_2$  表示双峰曲线取极大值对应的横坐标,  $g(b_1)$

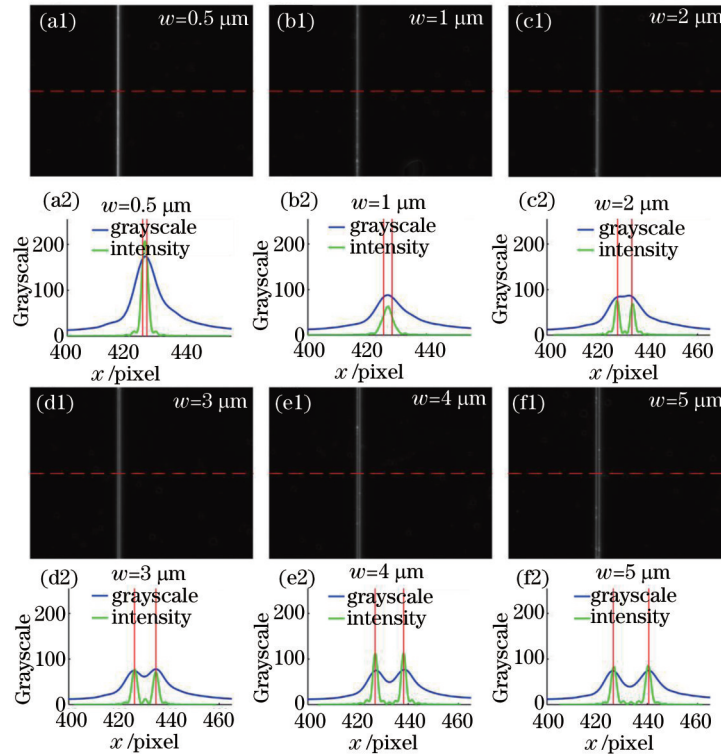


图9 矩形缺陷暗场图像及光强分布图

Fig.9 Dark-field images and intensity distribution graphs of rectangle-shaped defects

与  $g(b_2)$  分别对应两个极大值, 并且有  $g(b_1) = g(b_2) = a + g_0$ , 如图 10 所示, 实线是实际灰度数据分布曲线, 虚线是双高斯法拟合数据曲线。

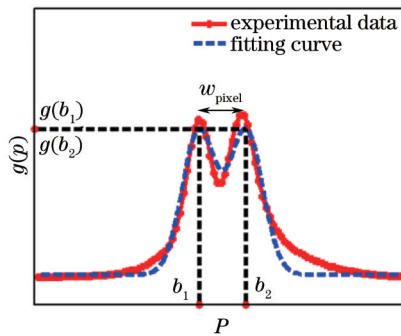


图 10 缺陷宽度双高斯函数拟合示意图

Fig.10 Illustration of defect width calibration by double Gaussian curve fitting

缺陷在图像上的像素宽度  $w_{\text{pixel}}$  满足

$$w_{\text{pixel}} = |b_1 - b_2|. \quad (3)$$

最后把双峰之间的像素宽度  $w_{\text{pixel}}$  按照物像关系换算为成像宽度  $w_{\text{image}}$ , 有

$$w_{\text{image}} = F w_{\text{pixel}} = \frac{s_x}{\beta} w_{\text{pixel}}, \quad (4)$$

式中  $F$  是一个比例系数, 单位是 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ),  $s_x$  是单个 CCD 像素  $x$  方向尺寸,  $\beta$  是系统放大倍率。

将 0.5~5  $\mu\text{m}$  宽度缺陷各宽度值汇总成表 1。  $w$  表示缺陷的理想设计宽度值,  $w_{\text{SEM}}$  是使用扫描电子显微镜 (SEM) 对标准板进行测量得到的宽度,  $w_{\text{FDTD}}$  是 FDTD 仿真得到的散射光强双峰间的宽度,  $w_{\text{image}}$  是通过双高斯拟计算出的图像宽度。大部分宽度偏差在 0.15  $\mu\text{m}$  以内, 最大宽度偏差不超过 0.3  $\mu\text{m}$ 。  $w < 3 \mu\text{m}$  矩形缺陷的仿真光强分布与图像灰度分布具有良好的 consistency, 但是由于是单峰分布, 不适用于双高斯函数拟合的方法, 因此没有在表 1 中列出。这些缺陷的处理会在后文中做进一步讨论。由以上说明可以看出, SDDES

的检测精度非常高,采用矩形截面缺陷标准板对系统进行定标是合理的。

表 1 0.5~5 μm 矩形缺陷各宽度值比较

Table 1 Comparison of types of defect widths (0.5~5 μm)

$w/\mu\text{m}$	$w_{SEM}/\mu\text{m}$	$w_{FDTD}/\mu\text{m}$	$w_{image}/\mu\text{m}$
0.5	0.5058	-	-
1	1.0657	-	-
2	2.0280	2.16	-
3	3.0363	2.98	3.1680
4	4.0167	3.99	4.1325
5	5.0933	4.88	5.1391

矩形缺陷的理论仿真结果与缺陷标准板的成像实验结果具有良好的一致性,在此基础上,分析三角形缺陷散射成像的仿真数据,可以为 SDES 对光学加工产生的实际缺陷进行检测提供理论支持。如第 4.1 节中图 5 所示,三角形缺陷散射成像的光强分布多为单峰形或山字形,直接通过分布形态得出光强分布与缺陷尺寸的关系较为困难。图 11(a)是仿真得到的三角形缺陷散射成像光强分布示意,横轴是 CCD 像面尺寸  $x$ ,纵轴是像面光强  $I$ 。可以看出, $x$  方向上散射光强超出背景光强的区域宽度  $w'$  (竖直线标出)略大于缺陷的理论宽度  $w$  (竖直线标出)。考虑从特殊位置处入手进行分析,定义三角形缺陷理论宽度处 ( $x = \pm \frac{w}{2}$ ) 的光强为全宽光强阈值  $I_{FW}$ 。图 11(b)是图 5 中各尺寸三角形缺陷的全宽光强阈值  $I_{FW}$ 。可以看出,  $w \geq 3 \mu\text{m}$ 、 $D_{WR} = 0.1$  的三角形缺陷的  $I_{FW}$  均位于 0.03~0.042 这一范围内,几乎没什么变化。定义去除粗差  $I_{FW}$  的平均值为阈值常数  $I_t$ ,而将三角形缺陷的光强分布曲线超出  $I_t$  的部分在  $x$  方向上的投影宽度作为缺陷宽度。在实际缺陷图像的处理过程中,  $I_t$  的物理意义为对应缺陷边缘提取二值化阈值  $g_t$ ,由此可看出合理选择  $g_t$  是缺陷检测准确性的基础。

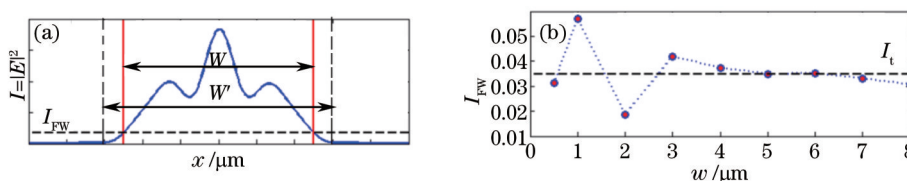


图 11 三角形缺陷全宽光强阈值。(a) 缺陷全宽光强阈值示意图; (b) 缺陷全宽光强阈值误差图

Fig.11 Intensity threshold of triangle-shaped defect. (a) Illustration of full-width intensity threshold; (b) error analyzing graph of full-width intensity threshold

最后对  $w < 3 \mu\text{m}$  的两种形状缺陷进行分析。 $w < 3 \mu\text{m}$  缺陷的散射光强分布均为单峰形。这是由于缺陷宽度较小,主要起作用的是衍射效应。像面光强分布形态基本上已经与缺陷形状无太大关系,三角形缺陷与矩形缺陷的像面光强分布基本是一致的,在成像时相对于其实际宽度有着明显的展宽。单峰形分布曲线不适于使用双高斯拟合法求解,而使用分析三角形缺陷时的阈值法进行分析。使用阈值法对  $w = 0.5 \mu\text{m}$  矩形缺陷进行处理进行示例说明。图 12(a)是  $w = 0.5 \mu\text{m}$  矩形缺陷暗场图像及灰度曲线,使用二值化分割阈值  $g_t$  处理图像计算得出缺陷宽度  $w_{th}$  为  $6.16 \mu\text{m}$ ; 图 12(b)是相应的  $w = 6 \mu\text{m}$  矩形缺陷暗场图像及灰度曲线。

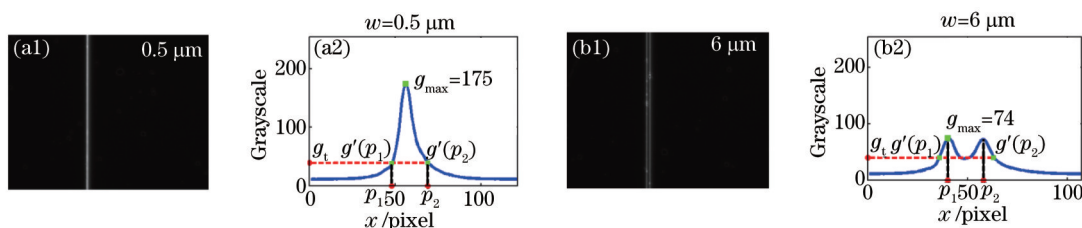


图 12  $w = 0.5 \mu\text{m}$  矩形缺陷阈值法处理结果。(a)  $w = 0.5 \mu\text{m}$  矩形缺陷暗场图像及灰度曲线;

(b)  $w = 6 \mu\text{m}$  矩形缺陷暗场图像及灰度曲线

Fig.12 Results of rectangular defects ( $w=0.5 \mu\text{m}$ ) processed by threshold method. (a) Dark-field image and grayscale graph of  $w=0.5 \mu\text{m}$  defects; (b) dark-field image and grayscale graph of  $w=6 \mu\text{m}$  defects



表 2 0.5  $\mu\text{m}$  和 6  $\mu\text{m}$  矩形缺陷灰度曲线特征参数表  
Table 2 Parameters of grayscale graph of rectangular defects (0.5  $\mu\text{m}$ , 6  $\mu\text{m}$ )

$W/\mu\text{m}$	$w_{\text{th}}/\mu\text{m}$	$g_{\text{max}}$	$g'(p_1)$	$g(p_2)$
0.5	6.16	175	5.7	-3.615
6	6.13	74	8.475	-5.565

$w = 0.5 \mu\text{m}$  矩形缺陷的展宽宽度与  $w = 6 \mu\text{m}$  矩形缺陷的宽度相当。如果只使用阈值法得到的宽度无法将宽度分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $6 \mu\text{m}$  的矩形缺陷分开。因此在对  $w < 3 \mu\text{m}$  的缺陷图像进行处理时,除了利用阈值法计算宽度  $w_{\text{th}}$  外,还需要引入最大灰度  $g_{\text{max}}$ 、阈值处的灰度梯度  $g'(p)$  等多维辅助参数进行识别。图 12 中,最大灰度标示为  $g_{\text{max}}$ , 阈值处的灰度梯度是指虚线  $g = g_i$  与灰度曲线相交位置处的灰度梯度,即图中  $p_1$ 、 $p_2$  处的灰度梯度  $g'(p_1)$ 、 $g'(p_2)$ 。表 2 是  $0.5 \mu\text{m}$  和  $6 \mu\text{m}$  缺陷灰度曲线参数表。 $0.5 \mu\text{m}$  缺陷图像最大灰度为 175,  $6 \mu\text{m}$  缺陷图像最大灰度为 74。因此可以通过最大灰度的差异将真实  $6 \mu\text{m}$  宽度的缺陷与因为衍射效应展宽为  $6 \mu\text{m}$  的  $0.5 \mu\text{m}$  宽度缺陷区分开。总之,使用阈值法对  $w < 3 \mu\text{m}$  的缺陷进行处理时,单独使用第一维参数阈值法宽度  $w_{\text{th}}$  不能计算出正确的缺陷宽度,需要综合参考第二参数最大灰度  $g_{\text{max}}$ 、第三、第四参数阈值处灰度梯度  $g'(p_1)$ 、 $g'(p_2)$  对缺陷灰度曲线进行模式识别,进而反推出缺陷宽度。

## 5 结 论

本文结合显微散射暗场成像原理,建立了光学元件表面缺陷的散射仿真检测模型。采用有限时域差分方法结合仿真软件模拟实现了环形白光光源在不同尺寸三角形、矩形缺陷在光学元件上半空间的散射光场分布,并模拟了散射光在像面的分布情况。同时使用表面缺陷数字化评价系统及系统缺陷样本标准板进行了实验,并对缺陷样本暗场图像的灰度分布情况进行了对比研究。仿真和实验结果表明,  $w > 3 \mu\text{m}$  的矩形缺陷的散射成像呈双峰分布,两个峰值的位置对应缺陷边缘,可以使用双高斯拟合法对缺陷宽度进行计算。 $w > 3 \mu\text{m}$  的三角形缺陷在像面的散射光分布呈山字形,对暗场图像进行处理时可以通过选取合适的二值化分割阈值计算得到其宽度。 $w < 3 \mu\text{m}$  的两种缺陷在散射成像条件下都呈单峰分布,阈值法计算宽度大于其真实宽度,但这类缺陷的最大灰度级与计算宽度对应宽度的真实缺陷的最大灰度级存在着显著差别,检测宽度在  $3 \mu\text{m}$  以下的缺陷时,需要综合阈值计算宽度、最大灰度、阈值处灰度梯度等多维参数对缺陷进行识别。实验结果与仿真结果具有良好的一致性,说明系统缺陷标定方法是科学合理的。为光学元件表面缺陷散射成像检测法提供了数据支持和理论依据,同时对数字化光学加工与检测中缺陷标准的确立具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 Thompson C E, Knopp C F, Decker D E. Optics damage inspection for the NIF[C]. SPIE, 1999, 3492: 921-932.
- 2 Li Zhongya, Cheng Lei, Li Chengfu. Study of laser damage of fused silica and sapphire crystal[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(10): 920-924.  
李仲伢, 程 雷, 李成富. 熔石英玻璃和白宝石晶体激光损伤的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 920-924.
- 3 Li Yuhua, Ma Fajun, Dai Nengli, et al.. Ultra-short pulsed laser-induced damage in inorganic silicon materials[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 1009-1013.  
李玉华, 马法君, 戴能利, 等. 超短脉冲激光对无机硅材料的损伤[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 1009-1013.
- 4 Guo Yajing, Tang Shunxing, Tang Qing, et al.. Study of laser-induced damage in fused silica by 351 nm laser near-field irradiation[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502004.  
郭亚晶, 唐顺兴, 唐 清, 等. 基于激光近场辐照的 351 nm 激光诱导熔石英损伤研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502004.
- 5 Pishkenari H N, Meghdari A. Surface defects characterization with frequency and force modulation atomic force microscopy using molecular dynamics simulations[J]. Current Applied Physics, 2010, 10(2): 583-591.
- 6 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.

- 7 Liu Dong, Yang Yong, Wang Lin, *et al.*. Microscopic scattering imaging measurement and digital evaluation system of defects for fine optical surface[J]. Opt Commun, 2007, 278(2): 240-246.
- 8 Liu Dong, Wang Shitong, Cao Pin, *et al.*. Dark-field microscopic image stitching method for surface defects evaluation of large fine optics[J]. Opt Express, 2013, 21(5): 5974-5987.
- 9 Yang Yongying, Wang Shitong, Chen Xiaoyu, *et al.*. Sparse microdefect evaluation system for large fine optical surfaces based on dark-field microscopic scattering imaging[C]. SPIE, 2013, 8838: 883806.
- 10 Wang Shitong, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.*. Distortion correction in surface defects evaluating system of large fine optics[J]. Opt Commun, 2014, 312: 110-116.
- 11 Li Lu, Liu Dong, Cao Pin, *et al.*. Automated discrimination between digs and dust particles on optical surfaces with dark-field scattering microscopy[J]. Appl Opt, 2014, 53(23): 5131-5140.
- 12 Zhang Liuchen, Xu Song. The Application of Finite Element Method in Electromagnetic Calculations[M]. Beijing: Chinese Railway Publishing House, 1996.  
张榴晨, 徐 松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- 13 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.  
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- 14 Stokowski S, Vaez-Iravan M. Wafer inspection technology challenges for ULSI manufacturing[C]. AIP Conference Proceedings, 1998: 405-418.
- 15 Wang Yi, Xu Qiao, Chai Liqun, *et al.*. Simulation and analysis of electromagnetic field distributing around fused silica scratch[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(1): 67-70.  
王 毅, 许 乔, 柴立群, 等. 熔石英表面划痕附近电磁场分布模拟分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 67-70.
- 16 Chen Jiabi, Su Xianyu, Zhu Weili. Principle and Application of Optical Information Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.  
陈家璧, 苏显渝, 朱伟利. 光学信息技术原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- 17 Lumerical. Imaging[OL]. [http://docs.lumerical.com/en/index.html?micro\\_and\\_lith\\_imaging.html](http://docs.lumerical.com/en/index.html?micro_and_lith_imaging.html). [2015-4-24].
- 18 Bennett J, Burge D, Rahn J, *et al.*. Standards for optical surface quality using total integrated scattering[C]. Technical Symposium East, 1979: 124-132.
- 19 Wang Fengpeng. The measurement of the point spread function in optical system with CCD[J]. Journal of Gannan Teachers' College, 2005, (6): 17-18.  
王凤鹏. 用 CCD 测定光学系统的点扩散函数[J]. 赣南师范学院学报, 2005, (6): 17-18.
- 20 An Gang. Point-Spread Function of CCD's Optical Systems and the Application in Sub-Pixel Edge Localization[D]. Changchun: Jilin University, 2008.  
安 岗. CCD 光学成像系统的点扩散函数及其在亚像素边缘定位中的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2008.

栏目编辑: 何卓铭