

# 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究

崔 辉<sup>1,2</sup> 刘世杰<sup>1</sup> 赵元安<sup>1</sup> 杨 俊<sup>1,2</sup> 刘 杰<sup>1,2</sup> 刘文文<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 亚表面缺陷的检测和去除对于提高光学元件的激光损伤阈值至关重要。结合全内反射显微技术和数字图像处理技术获得光学元件亚表面缺陷信息的新方法,利用显微镜系统的有限焦深,对亚表面缺陷沿深度方向扫描,可以获得不同离焦量下的散射图像,通过数字图像处理技术,建立缺陷散射图像清晰度评价与离焦量的关系,通过清晰度曲线得到亚表面缺陷的深度位置及深度尺寸。模拟全内反射显微平台的成像过程,讨论微调过程中全内反射显微成像的特点。缺陷深度位置及深度尺寸的测量精度主要由载物台精密调焦机构的精度以及显微镜的焦深决定,一般可达微米量级。利用飞秒激光加工技术制备尺寸和位置已知的微结构,使用该方法准确获得了微结构信息,验证了该方法的有效性。

**关键词** 测量;亚表面缺陷;全内反射显微法;清晰度评价;微调焦;成像模拟;飞秒刻写

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0612004

## Study on Total Internal Reflection Microscopy for Subsurface Damage

Cui Hui<sup>1,2</sup> Liu Shijie<sup>1</sup> Zhao Yuanan<sup>1</sup> Yang Jun<sup>1,2</sup> Liu Jie<sup>1,2</sup> Liu Wenwen<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Subsurface damage (SSD) detection and removal play an important role in improving the laser induced damage threshold (LIDT) of optics. A new method to detect the distribution of SSD is proposed. This method combines total internal reflection microscope and digital image processing technology. Because of the limited focal depth of the microscope system, one can get different images focusing at different depth levels by a total internal reflection microscopy (TIRM). The connection between the definition curve of TIRM image sequence and the depth position of SSD is established. Also, the depth length of SSD through the feature of definition curve is obtained. The imaging process of TIRM is simulated and the typical features of the focusing process is found out. Size information of the microstructures is got exactly according to the fabricated microstructures by femtosecond laser micromachining. Focal depth of the microscope determines the test depth accuracy of our method and actually the test accuracy can achieve 1  $\mu\text{m}$ .

**Key words** measurement; subsurface damage; total internal reflection microscope; definition evaluation; micro focusing control; imaging simulation; femtosecond laser micromachining

**OCIS codes** 140.3330; 290.5820; 110.0180

## 1 引 言

强激光系统中,光学元件的抗激光损伤能力至关重要。研究发现,亚表面缺陷<sup>[1-2]</sup>是制约光学元

件激光损伤阈值提高的重要因素<sup>[3-5]</sup>。快速、准确的亚表面缺陷表征方法作为进一步探索亚表面缺陷的基础受到越来越多的关注。

**收稿日期:** 2013-12-08; **收到修改稿日期:** 2014-01-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(11104295)

**作者简介:** 崔 辉(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学元件亚表面缺陷无损探测方面的研究。

E-mail: cuihui@siom.ac.cn

**导师简介:** 刘世杰(1979—),男,博士,副研究员,主要从事衍射光学和光学检测等方面的研究。

E-mail: shijieliu@siom.ac.cn(通信联系人)

目前亚表面缺陷的表征方法可以分为两大类：有损探测法<sup>[6-8]</sup>和无损探测法。相对于有损探测法,无损方法更为迅速,效率更高。常用的无损探测亚表面缺陷的方法主要有:共聚焦显微技术<sup>[9]</sup>、光学相干层析技术<sup>[10]</sup>以及全内反射显微技术等。共聚焦显微技术探测亚表面缺陷时必须做逐点扫描,效率很低;另外,其工作于荧光模式时,样品在抛光过程中必须引入荧光物质。光学相干层析技术的深度分辨率依赖于光源的相干长度,其典型的纵向分辨率为十几微米<sup>[11]</sup>,难以用来表征熔石英等光学元件的亚表面缺陷。全内反射显微装置由全内反射照明单元与显微单元组成,具有结构简单、成本低、容易实现大面积快速检测及在线检测等优点。

全内反射显微技术由 Temple<sup>[12-13]</sup>最先提出。Liao 等<sup>[14]</sup>将 TIRM 图像与有损蚀刻法获得的亚表面缺陷图像进行比较,研究了不同抛光条件对元件亚表面缺陷的影响。Sheehan 等<sup>[15]</sup>将全内反射显微技术用于熔石英光学元件的激光损伤的研究之中,探讨了“全内反射荧光显微镜(TIRM)质量”与损伤阈值之间的关系。然而,由于全内反射显微法获得的散射图像中同时包含了表面缺陷和亚表面缺陷的散射信号,无法对亚表面缺陷做进一步定量分析。如何区分表面缺陷和亚表面缺陷成为一个难题。Sheehan 等<sup>[15]</sup>曾尝试结合 TIRM 与原子力显微镜(AFM)来区分表面缺陷与亚表面缺陷,但效果一般。计算机和数字图像处理技术的发展使得人们可以对 TIRM 图像做进一步处理,为区分表面缺陷和亚表面缺陷甚至得到任意深度亚表面缺陷分布信息提供了可能。

本文提出一种基于全内反射显微技术探测亚表面缺陷信息的新方法,利用显微镜系统的有限焦深,对亚表面缺陷沿深度方向分别进行散射成像,可以获得不同离焦量下的散射图像,通过数字图像处理技术,建立散射图像清晰度评价与离焦量的关系,进一步由清晰度曲线得到亚表面缺陷的深度位置及深度尺寸。建立了基于该原理的实验装置,并对飞秒直写得到的微结构进行了清晰度评价分析,实验结果验证了所提出方法的可行性。

## 2 理 论

全内反射显微法利用全内反射原理,对光学元件表面和亚表面的缺陷进行散射显微成像。如图 1 所示,照明激光以大于临界角的入射角照射到样品表面,当存在缺陷时,全内反射条件被破坏,出射的

缺陷散射光被显微镜接收后得到散射图像。一般散射光斑尺寸会略大于缺陷的实际尺寸。较大的缺陷散射光斑形状与实际缺陷形状相似,当缺陷尺寸可以与光波长相比拟时,衍射现象不可忽略,散射光斑是缺陷的衍射图样。

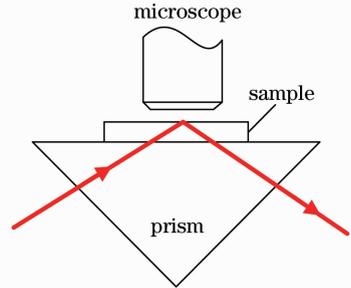


图 1 TIRM 原理示意图

Fig. 1 Schematic of TIRM

由于显微镜成像系统具有有限的焦深,当显微镜聚焦于光学样品表面以下一定深度时,位于该深度的亚表面缺陷将清晰成像,其他深度上的缺陷在像面上则表现为模糊程度不同的散射光斑。TIRM 图像中散射光斑的模糊程度可以用清晰度评价函数定量描述。图像清晰度的评价可以从空域、频域和信息熵的角度来分析。尽管许多清晰度评价函数在一定程度上都能达到评价模糊程度的目的,但是很难同时满足评价速度和评价精度的要求。实验中获得抛光样品的 TIRM 图像的结构比较简单,基于小波变换的清晰度评价函数可以多尺度分析问题,能够在速度和精度之间找到一个较好的平衡点。

TIRM 图像的大部分能量集中于低频部分,它对应于图像的基本轮廓。而高频部分对应于图像的细节。据此,对图像做快速小波变换,对高频部分取绝对值求和

$$E = \sum_{i,j} (|c_{LH}| + |c_{HL}| + |c_{HH}|), \quad (1)$$

式中  $c_{LH}$  为图像中垂直方向高频、水平方向低频部分的小波系数, $c_{HL}$  为垂直方向低频、水平方向高频部分的小波系数, $c_{HH}$  为垂直方向和水平方向都为高频部分的小波系数。 $E$  越大,考察区域图像越清晰,反之越模糊。

按照“离焦-聚焦-离焦”的过程,对于深度尺寸小于微调焦步阶或显微镜焦深的缺陷,清晰度曲线应该是开口向下的单尖峰形状,如图 2 所示。根据曲线峰的位置,可以推断出缺陷的深度位置。这类缺陷常包括杂质、坑点、塑性划痕和横向裂纹。其中,杂质和坑点在 TIRM 图像中表现为尺寸很小的散射光斑;对于塑性划痕,由于其深度一般较浅(几

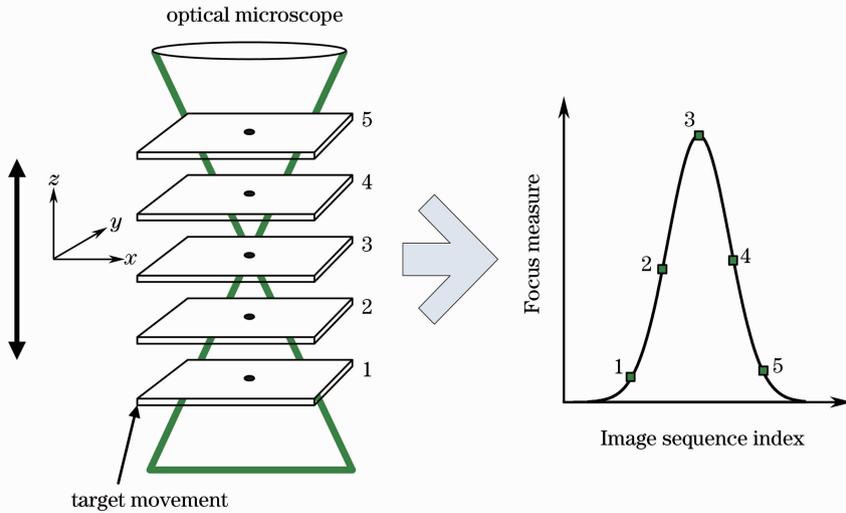


图 2 理想点缺陷的“离焦-聚焦-离焦”过程及其清晰度曲线

Fig. 2 "Defocus-focusing-Defocus" process and definition curve for ideal point defect

十纳米至  $1\ \mu\text{m}$  左右), 其在 TIRM 图上表现为条状散射斑; 横向裂纹与表面交叉以后即产生材料去除, 若没有与表面交叉, 这种裂纹就会保留在元件中, 成为亚表面缺陷。这种缺陷一般深度尺寸也比较小, 产生的散射斑为形状多样、大小不一的亮斑。另外一类缺陷的深度尺寸大于显微镜焦深, 这类缺陷主要是纵向裂纹。纵向裂纹一般呈斜向下开裂, 其横向截面形状可能是长条形, 也可能是弧形, 甚至可能为环状。对于深度尺寸较大的缺陷, 其清晰度曲线一般为分段形式。根据曲线第一转折点的位置, 可以获得缺陷的深度位置信息; 从曲线中间段的长度可以推断出缺陷的深度尺寸。对视场范围内的所有缺陷分别作清晰度评价分析后, 最终可以给出样品亚表面损伤的整体定量评价。

### 3 模拟分析

为了进一步阐述微调焦过程与清晰度曲线之间的关系, 通过模拟显微镜的成像过程<sup>[16]</sup>, 得到不同深度上的 TIRM 模拟图像。计算得到两类缺陷的清晰度曲线, 分析了清晰度曲线与缺陷结构尺寸和深度位置的关系。

根据光学成像理论, 像是物与显微成像系统点扩散函数卷积的结果。在不考虑像差的情况下, 一般显微镜系统[数值孔径(NA)较小]的点扩展函数为<sup>[17]</sup>

$$h(x, y, z; \lambda) = C \exp(-ikz) \int_0^1 J_0(k\rho at) \times \exp\left(\frac{i}{2}kz\alpha^2 t^2\right) t dt, \quad (2)$$

式中  $C$  为一常量,  $J_0$  为一类 0 阶贝塞尔函数,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\alpha$  为物镜孔径半角。

点扩展函数三维光强分布为

$$I(x, y, z, \lambda) = |h(x, y, z, \lambda)|^2. \quad (3)$$

针对实验中搭建的 TIRM 平台, 模拟构建了一个物镜放大倍率为  $50\times$ , 数值孔径为 0.75, 用绿光 (532 nm) 照明的显微系统。

对于一个深度尺寸可忽略的球形点缺陷(直径 100 nm)进行 TIRM 成像模拟。图 3(a)为该缺陷在不同离焦量时所成的像。可以看出, 缺陷逐渐偏离聚焦面的过程伴随着衍射现象, 能量随之逐渐弥散开, 散射光斑也越来越模糊。为了更清晰地表示出光斑形状随离焦量的变化情况, 对每张图片强度做归一化处理, 得到的结果如图 3(b)所示。

实际情况中, 由于亚表面缺陷分布在样品表面以下不同深度位置, 调焦过程中, 有些散射点由清晰到模糊, 而有些散射点则由模糊到清晰。当缺陷尺寸可与波长比拟时, 衍射现象不可忽略。实际中缺陷尺寸越小, 散射光越弱, 当缺陷尺寸小到一定尺寸后, 在得到的 TIRM 图像中不一定观察到明显的衍射现象。这与文献[18]得到的实验结果一致。

用(1)式表达的清晰度评价函数对圆形缺陷不同离焦量状态下得到的一系列散射图像进行清晰度评价分析, 得到如图 3(c)所示的清晰度曲线。图中横坐标为缺陷离焦量, 负值表示缺陷位于聚焦面的上方, 正值表示缺陷位于聚焦面的下方。纵坐标表示归一化后的清晰度评价结果。显然, 当考察缺陷位于聚焦面上时, 得到的散射光斑图像具有最大的清晰度值。

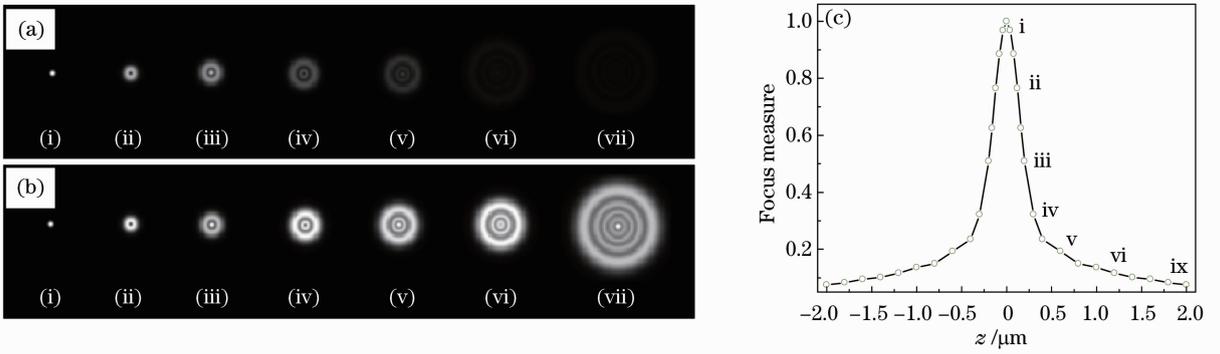


图 3 (a)、(b)球形点缺陷的调焦成像模拟结果；(c)球形点缺陷的清晰度评价结果

深度尺寸大于显微镜焦深的缺陷主要是纵向裂纹。模拟如图 4(a)所示的“V”型缺陷成像。模拟实验中,在深度方向上取了 13 张逐渐变细变小的离散矩形环来描述图 4 中的裂纹。聚焦于不同位置时得到的 TIRM 图像是 13 层上的物在聚焦层上光场分布的积分。进一步计算得到的清晰度曲线如图 4(b)所示。可以看出,该缺陷的清晰度曲线分为了三段。由于模拟中将缺陷离散为 13 个矩形环,所以计算得到的清晰度曲线在中间段(gentle slope)清晰度评价有微小波动。实际情况中,对于一个单独的纵

向裂纹,其清晰度曲线的中间段应该是平缓单调的。然而,通常纵向的中位裂纹都会伴有与之相连接的横向裂纹,这些横向裂纹的存在使得在中间段部分会产生微小波动,形成“次峰”。从曲线第一个转折点,可以获得缺陷的深度位置;从两个转折点之间的距离可以计算出缺陷的深度尺寸。本例中,中间段部分共包含 10 个点,考虑到两个转折点,可以推算出缺陷的深度尺寸在 12~13 μm 之间,与设计的结构基本一致。

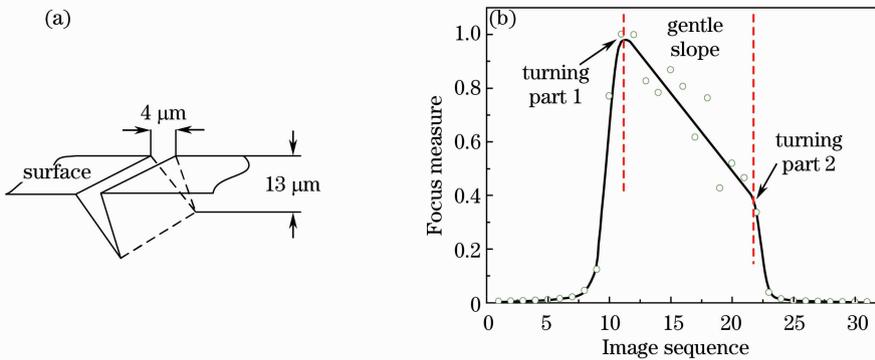


图 4 (a)“V”裂纹；(b)“V”裂纹对应的清晰度曲线形状  
Fig. 4 (a) V-shape crack; (b) definition curve of the crack

### 4 实验验证

为了验证微调焦法判断缺陷尺寸及深度位置的有效性,使用微调焦法测量已知微小结构的信息,微小结构由飞秒激光微加工技术<sup>[19-20]</sup>制备获得。实验中使用飞秒激光在  $\Phi 50 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$  的熔石英玻璃表面打出两个坑,在表面以下约  $29.4 \mu\text{m}$  ( $1.47 \times 20 \mu\text{m}$ ) 处刻写一条状结构。图 5 给出了飞秒损伤坑和长条结构分别清晰聚焦时的显微照片。

图 6 为 TIRM 平台结构示意图,包括激光器、

精密调焦单元、光束入射角调整单元、数字图像显微镜。其中激光器的输出功率可在 0~2 W 调节,波长为 532 nm,显微镜型号为 Leica DMR250。精密调焦单元可实现微米级的精密调焦。实验中采用熔石英材质的直角棱镜,样品与直角棱镜通过折射率匹配液耦合在一起。

通过精密调焦单元连续改变物距,步阶定为  $0.7 \mu\text{m}$ ,获得聚焦面处于不同位置的图像序列。计算得到的飞秒激光损伤坑 A 的清晰度曲线如图 7(a)

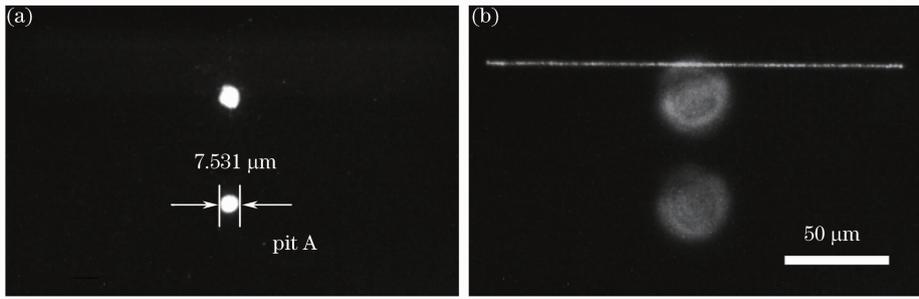


图 5 飞秒标记显微图像。(a)损伤坑清晰聚焦；(b)长横标记清晰聚焦

Fig. 5 Microscopic images of the structures written by femtosecond. (a) Focused on the surface; (b) focused on the strip

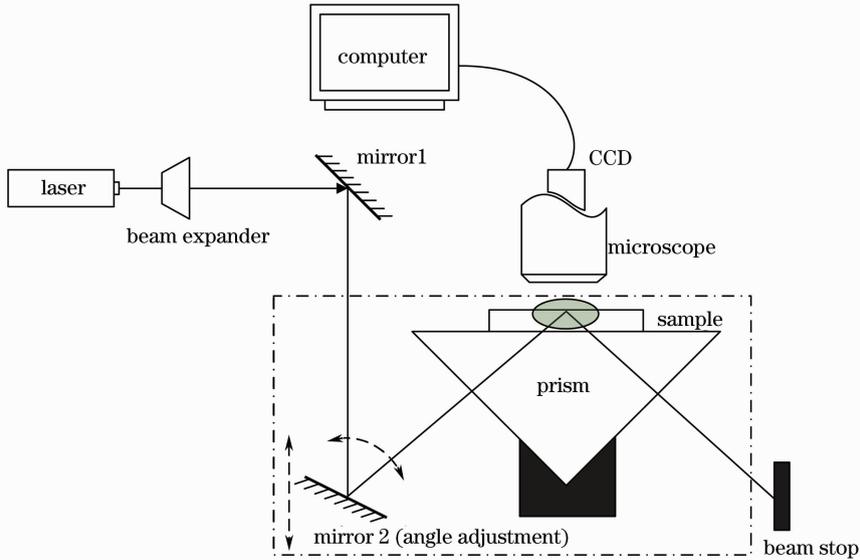


图 6 TIRM 光路示意图

Fig. 6 Schematic of TIRM setup

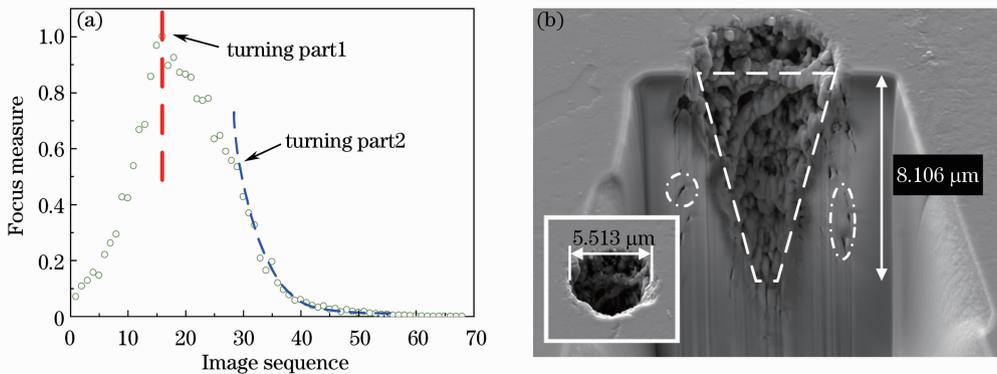


图 7 (a)飞秒损伤坑清晰度曲线；(b)飞秒损伤坑 FIB 切割结果

Fig. 7 (a) Focus measure result of the pit; (b) section profile of the pit

所示,由图可以看出第二转折点不明显,推断该坑形貌为“V”型。分析曲线斜率的变化可以大致确定出第二转折点的位置。最终得到的中间段包含了约 12 张照片,则 V 型坑深度为  $12 \times 0.7 = 8.4 \mu\text{m}$ 。

使用聚焦离子束(FIB)将该坑切开,得到如图 7(b)所示的剖面图。显然该坑为“V”型坑,坑深约  $8.106 \mu\text{m}$ ,与前面由清晰度曲线估计的结果基本

吻合。由图 7(b)可以看出,清晰度评价函数曲线上的毛刺主要由图中虚线圈示部分的结构引起。比较坑实际横向尺寸与散射光斑的横向尺寸可知,散射成像对微米量级的结构具有一定的放大作用(由  $5.513 \mu\text{m}$  放大到  $7.531 \mu\text{m}$ )。

对表面以下的长条状结构做清晰度评价,可得到如图 8 所示的结果。可以看出其曲线线型为单尖

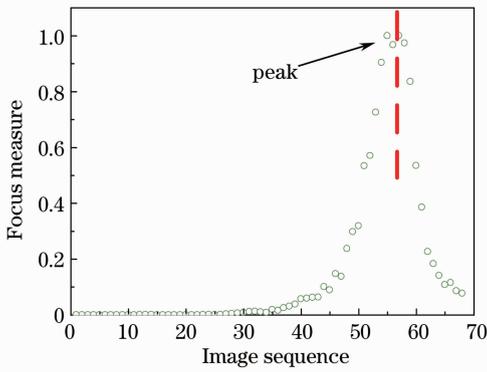


图 8 长条状结构清晰度评价结果

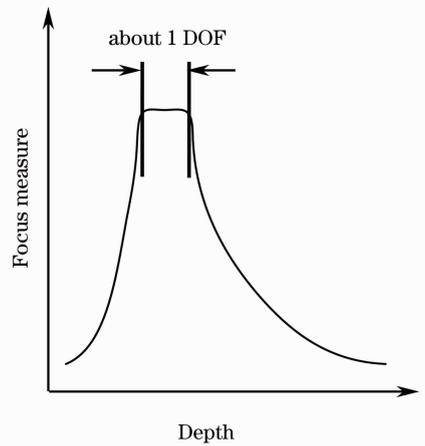
Fig. 8 Focus measure result of the strip

峰结构,故长条结构深度尺寸较小,根据峰值的位置可以推断出该长条结构位于表面以下 $(57-16) \times 0.7 = 28.7 \mu\text{m}$ 处,与实际情况基本一致。因此,基于清晰度曲线可有效获得微结构的尺寸和深度位置信息。

## 5 讨 论

TIRM系统横向上的分辨率由显微镜的横向分辨率决定,受衍射极限限制,横向分辨率极限约为200 nm。散射光的强弱以及显微镜的集光能力决定了缺陷能否被显微镜探测到。在较高信噪比的TIRM图像中,可以清晰分辨出纳米量级大小缺陷的散射斑。实验中,缺陷的横向尺寸可由缺陷散射光斑的尺寸来估计。由于衍射、像差的存在,即使清晰聚焦获得的散射光斑尺寸也比缺陷的实际尺寸要大,且不同的成像系统放大的比例不同。另外,表现在全内反射显微图像上的光斑大小与CCD图像采集系统的光强灵敏度和照明光强度也有关系。一般而言,CCD光强灵敏度越大或照明光越强,同样条件得到的缺陷散射斑越大,反之越小。

根据清晰度评价函数的峰位或拐点位置来判断缺陷的深度位置,同时根据清晰度评价曲线形状来获得缺陷深度尺寸的信息。即每一次调焦拍摄一张TIRM图像,并记录对应的深度位置,最终缺陷的深度位置是由TIRM图像的深度位置得来,所以微调焦步阶越小,最终得到的缺陷深度位置的范围就越小。但当步阶小于显微镜的焦深后,再减小步阶的大小,对于深度尺寸可以忽略的缺陷,清晰度评价在一定的宽度[约焦深(DOF)]将为恒定值,无法进一步缩小缺陷的位置范围。所以,显微镜焦深越小,通过清晰度曲线获得的缺陷深度尺寸信息越精确。同时,为了避免出现如图9所示的无效清晰度曲线,并

图 9 当  $l_{\text{step}} < l_{\text{DOF}}$ , 且缺陷深度尺寸小于  $l_{\text{step}}$  时, 单缺陷的清晰度曲线形状Fig. 9 Definition curve shape obtained when  $l_{\text{step}} < l_{\text{DOF}}$  and  $l_{\text{step}}$  is more than the depth length of defect

且保持测试效率,选择的微调焦步阶应满足: $l_{\text{step}} = l_{\text{DOF}}/2$ 。

实际实验中可以通过改变测量系统载物台的纵向位置来达到微调焦的目的。当使用的精密调焦机构可实现亚微米甚至纳米量级的微调焦时,获得的缺陷深度尺寸和深度位置精度将由显微镜的焦深决定。一般50×物镜焦深约为 $1 \mu\text{m}$ ,所以用全内反射微调焦方法获得的缺陷尺寸及位置精度为微米量级。TIRM系统深度分辨能力直接决定了微调焦法对于叠层缺陷的识别能力。一般对于50×的物镜,如果叠层缺陷之间的间距小于 $1 \mu\text{m}$ ,微调焦法将无法有效地将两个缺陷区分开来;但对于深度间距大于 $1 \mu\text{m}$ 的叠层缺陷,清晰度评价曲线一般为多峰型,根据峰位可以确定叠层缺陷各个部分的深度位置。

## 6 结 论

将经典的全内反射显微方法与数字图像处理技术相结合,提出了基于全内反射技术检测亚表面缺陷尺寸深度信息的新方法,利用显微镜系统的有限焦深对亚表面缺陷沿深度方向分别进行散射成像,通过数字图像处理技术对获得的不同离焦量下的散射图像进行处理,建立了散射图像清晰度评价函数与离焦量的关系。从对清晰度曲线线型的讨论来看,亚表面缺陷种类的不同或分布的差异,会导致清晰度曲线线型的差异。根据清晰度曲线线型的特点,可以提取出缺陷尺寸信息及其在光学元件中的位置,最终可以对光学元件的亚表面损伤进行评估。

同时利用飞秒激光加工技术制备尺寸和位置已知的微结构,使用微调焦法准确获得了微结构的相关信息,验证了微调焦法的有效性。对  $50\times$  物镜,通过选择合适的微调焦步阶和清晰度评价函数,深度方向的测试精度可达微米量级。

### 参 考 文 献

- 1 P P Hed, D F Edwards, J B Davis. Subsurface damage in optical materials; origin, measurement and removal [C]. Technical Information Center Oak Ridge Tennessee, 1988. W-7405-ENG-48.
- 2 T Suratwala, L Wong, P Miller, *et al.*. Sub-surface mechanical damage distributions during grinding of fused silica [J]. *J Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(52-54): 5601-5617.
- 3 P E Miller, T I Suratwala, J D Bude, *et al.*. Laser damage precursors in fused silica [C]. SPIE, 2009, 7504: 75040X.
- 4 Jin Huang, Xinda Zhou, Hongjie Liu, *et al.*. Influence of subsurface defects on damage performance of fused silica in ultraviolet laser [J]. *Opt Eng*, 2013, 52(2): 024203.
- 5 Yang Minghong, Zhao Yuanan, Su Hanhan, *et al.*. Influence of subsurface cracks on the laser damage resistance of anti-reflection coated fused silica [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0807001. 杨明红, 赵元安, 苏涵韩, 等. 基底亚表面裂纹对减反射膜激光损伤阈值的影响 [J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0807001.
- 6 H Helbawi, L Zhang, I Zarudi. Difference in subsurface damage in indented specimens with and without bonding layer [J]. *Int J Mech Sci*, 2001, 43(4): 1107-1121.
- 7 J A Menapace, P J Davis, W A Steele, *et al.*. MRF applications; measurement of process-dependent subsurface damage in optical materials using the MRF wedge technique [C]. SPIE, 2005, 5991: 599103.
- 8 J Neauport, C Ambard, P Cormont, *et al.*. Subsurface damage measurement of ground fused silica parts by HF etching techniques [J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 20448-20456.
- 9 J Neauport, P Cormont, P Legros, *et al.*. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy [J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3543-3554.
- 10 M Bashkansky, M D Duncan, M Hahn, *et al.*. Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(1): 61-63.
- 11 Michael Duncan, Mark Bashkansky, John Reintjes. Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography [J]. *Opt Express*, 1998, 2(13): 540-545.
- 12 P A Temple. Total internal reflection microscopy; a surface inspection technique [J]. *Appl Opt*, 1981, 20(15): 2656-2664.
- 13 P A Temple. Examination of laser damage sites of transparent surfaces and films using total internal reflection microscopy [J]. *Natl Bur Std Spec Publ*, 1980, 726: 333-341.
- 14 Z M Liao, S J Cohen, J R Taylor. Total internal reflection microscopy (TIRM) as a nondestructive subsurface damage assessment tool [C]. SPIE, 1995, 2428: 43-53.
- 15 L M Sheehan, M Kozlowski, D W Camp. Application of total internal reflection microscopy for laser damage studies on fused silica [C]. SPIE, 1998, 3244: 282-295.
- 16 Qiliang Du, Xuesong Lan, Ling Yuan, *et al.*. An optical imaging simulation method for inverted microscope and its application in automatic cell manipulation [J]. *Adv Mater Res*, 2012, 490-495: 1981-1985.
- 17 M Gu. *Advanced Optical Imaging Theory* [M]. Springer, 2000.
- 18 Deng Yan, Xu Qiao, Chai Liqun, *et al.*. Total internal reflection microscopy: a subsurface defects identification technique in optically transparent components [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(6): 835-840. 邓燕, 许乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(6): 835-840.
- 19 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0201001. 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0201001.
- 20 He Fei, Cheng Ya. Femtosecond laser micromachining; frontier in laser precision micromachining [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(5): 595-622. 何飞, 程亚. 飞秒激光微加工: 激光精密加工领域的新前沿 [J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 595-622.

栏目编辑: 何卓铭