

熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术

张健浦¹, 孙焕宇¹, 王狮凌¹, 黄进², 周晓燕², 王凤蕊², 刘红婕², 刘东^{1*}

¹浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 熔融石英光学元件的亚表面缺陷直接影响着其成像质量及激光损伤阈值等指标。相比缺陷的二维截面大小以及深度信息,亚表面缺陷三维轮廓及缺陷体积的定量检测结果可以用来更准确地评估熔融石英光学元件的加工质量。结合共聚焦显微镜的成像原理,使用共聚焦显微镜进行了熔融石英样品层析扫描实验。通过对亚表面缺陷图像特点的分析,提出了适用熔融石英元件亚表面缺陷的三维重建算法。提出的算法在亚表面缺陷重建效率与精度上均优于其他三维重建方法。根据重建后缺陷的统计结果,定量获得了熔融石英样品亚表面缺陷的完整三维信息。

关键词 材料; 熔融石英; 亚表面缺陷; 三维重建; 激光共聚焦显微镜

中图分类号 TH161+.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0216001

Three-Dimensional Reconstruction Technology of Subsurface Defects in Fused Silica Optical Components

Zhang Jianpu¹, Sun Huanyu¹, Wang Shiling¹, Huang Jin², Zhou Xiaoyan²,
Wang Fengrui², Liu Hongjie², Liu Dong^{1*}

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Subsurface defects directly affect the imaging quality and laser damage threshold of fused silica optical components. In comparison with the two-dimensional cross-section size and depth of the defect, the quantitative detection results of the three-dimensional contour of the subsurface defect and its volume can facilitate a more accurate evaluation of the processing quality of the fused silica optical component. In this work, a tomography scanning experiment of the fused silica sample is performed using a confocal microscope based on the principle of confocal microscope. Moreover, a three-dimensional reconstruction algorithm for the subsurface defects of fused silica components is proposed based on the analysis of the characteristics of subsurface defect images. The proposed algorithm outperforms other reconstruction methods in terms of efficiency and accuracy. Based on the statistical results of the reconstructed defects, the complete three-dimensional information of the subsurface defects of the fused silica samples is quantitatively obtained.

Key words materials; fused silica; subsurface defects; three-dimensional reconstruction; laser confocal microscope
OCIS codes 160.6030; 100.6890; 100.2980; 180.1790

1 引 言

受控核聚变是近年来为了解决能源问题而出现的一个热门研究方向,惯性约束核聚变(ICF)方案是实现受控核聚变的重要途径之一。美国的国家点火装置(NIF)、法国的兆焦耳激光装置(LMJ)和我

国的神光系列装置都是典型的惯性约束核聚变系统,系统终端负责激光的频率转换以及激光的聚焦等功能,是整个装置的核心单元^[1]。终端有大量的熔融石英光学元件,这些原件要承受三倍频激光的最高通量^[2],最易发生激光损伤。此外,元件在加工过程(研磨、抛光)中也会不可避免地引入微裂纹、杂

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(41775023,61475141)

* E-mail: liudongopt@zju.edu.cn

质等缺陷。缺陷会影响元件的成像质量,残留的划痕、裂纹会对激光的电磁场产生调制作用,引发热效应,致使元件的局部温度过高,易导致热炸裂,从而大大降低了激光的诱导损伤阈值。为了保证制备的元件能够稳定地用于实际装置中,首先需要对制备的光学元件进行缺陷检测。

针对石英表面再沉积层中直接露出的缺陷,目前的检测手段已经十分成熟,将特定的光束照射石英表面,采用高分辨率相机接收缺陷的散射光^[3],最后通过一系列图像处理手段就可提取出最终的缺陷信息^[4-7]。掩盖在石英表面再沉积层下的亚表面缺陷同样较大地影响着光学元件的质量,然而,再沉积层以下的缺陷无法直接通过传统的光学方法进行探测。目前对于亚表面缺陷的检测技术尚处于发展阶段,近年来发展出破坏性和非破坏性检测两种方式。破坏性检测对样品表面进行部分或全部破坏,直接暴露出亚表面缺陷,常用的方法有氢氟酸腐蚀法、角度抛光法、磁流变抛光法等。非破坏性检测是在不二次损伤样品的前提下检测亚表面缺陷,如光学相干层析法^[8]、全内反射法^[9]等。以上非破坏性方法仅能定性检测亚表面缺陷,无法给出缺陷的量化细节信息。采用激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)直接观测亚表面缺陷是近年发展起来的一种新的非破坏性检测手段,检测精度可达亚微米量级,操作简单快速,可以定量获得缺陷的细节信息。Williams^[10]采用共聚焦显微镜通过荧光法检测了石英的亚表面缺陷,并与白光干涉仪、原子力显微镜等其他手段的检测结果进行了对比,对比结果证明了共聚焦显微镜检测亚表面缺陷的准确性;王景贺等^[11]采用共聚焦显微镜检测了荧光量子点,并分析了熔融石英亚表面层的损伤规律;王辉等^[12]模拟了共聚焦显微镜聚焦光斑在光学元件内部的散射光场分布,从理论上证明了采用激光共聚焦显微镜测量亚表面缺陷的可行性。

目前,已有的采用共聚焦显微镜检测亚表面缺陷的研究主要是针对缺陷的二维断层图像进行的,缺少对于缺陷三维信息的研究。为了获得缺陷的三维信息,需要对于采集的二维缺陷图像进行三维重建。本文首先研究了采用共聚焦显微镜检测熔融石英亚表面缺陷的原理,并对熔融石英样品进行了检测,然后分析了亚表面缺陷图像的特点,并据此提出了一种适用于熔融石英亚表面缺陷的图像处理与三维重建算法,最后定量检测出石英亚表面缺陷的三

维信息。本文弥补了前人研究的空白,为进一步研究熔融石英光学元件亚表面缺陷提供了参考。

2 基本原理

2.1 激光扫描共聚焦显微镜检测熔融石英成像的原理

激光共聚焦显微镜的原理如图 1(a)所示。激光器发出的光束先通过小孔,然后经由二向色镜并被其反射,再经物镜会聚到样品待测面上的某点。样品在会聚点激发出的荧光再经物镜和二向色镜会聚到探测器前的针孔处,最后被探测器接收。待测样品上对焦面的激光会聚点与探测器的针孔形成了共轭,来自非对焦点的反射光均被针孔滤除,如图 1(b)所示。特殊的针孔结构显著提高了共聚焦显微镜的轴向分辨率。执行扫描任务时,除了传统显微镜的二维横向扫描外,如图 1(c)所示,共聚焦显微镜还可以通过载物台在 z 轴方向精准步进,使显微镜对焦在样品不同的截面上,获得样品的一组光学切片层析图像。

采用激光扫描共聚焦显微镜检测熔融石英样品时,共聚焦显微镜可以采取两种模式,即散射模式与荧光模式,两种模式的原理如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,在散射模式下,由于采用了半透半反镜,最终通过针孔的光束主要来源于样品对焦点的散射。如图 2(b)所示,在荧光模式中,在将半透半反镜替换为二向色镜的同时增设了探测器前的滤光片,从而有效地滤除了样品对焦点发出的散射光,探测器仅对激发出的荧光进行接收。Neauport 等^[13]在其研究中对两种检测模式的效果,发现荧光模式下采集到的缺陷信号要比散射模式下更强,而且在荧光模式下可以暴露出散射模式下无法展现的较弱缺陷。

共聚焦显微镜直接采集到的是石英样品的截面层析图像,根据二维图像可以获得缺陷的截面轮廓与纵向深度信息。然而,样品的整体缺陷情况无法从二维图像中直观地得到,同时无法得到缺陷在样品中的三维体信息,包括缺陷的体积与形貌等。

2.2 亚表面缺陷的三维重建算法

为了获得完整的缺陷信息,需要重建出原始的亚表面缺陷。亚表面缺陷图像的采集方式有别于常见的待重建层析图像,具有其特有的图像特点,需要针对其特点设计适用的三维重建算法,算法可以分为预处理与层析图像重建两部分。

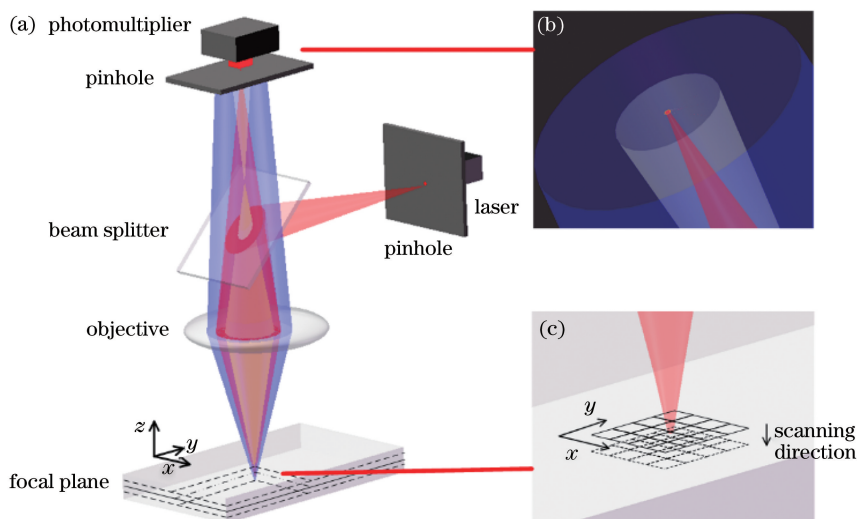


图 1 激光扫描共聚焦显微镜成像原理图。(a)装置原理;(b)针孔结构;(c)横向与纵向扫描

Fig. 1 Imaging principle of laser scanning confocal microscope. (a) Device principle; (b) pinhole structure; (c) horizontal and vertical scanning

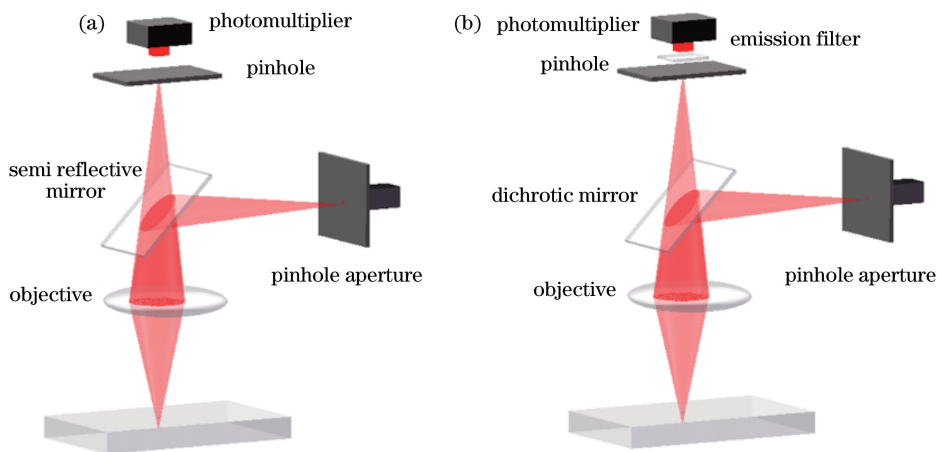


图 2 激光扫描共聚焦显微镜检测石英的两种模式。(a)散射模式;(b)荧光模式

Fig. 2 Two modes of silica detected by laser scanning confocal microscope. (a) Scattering mode; (b) fluorescence mode

2.2.1 图像的预处理

典型的激光扫描共聚焦显微镜采集的亚表面缺陷如图 3 所示,可以看出原始亚表面缺陷图像具有以下几个特点。1)缺陷数据具有稀疏性。对元件的亚表面缺陷进行检测时,大部分视场与图 3(a)类似,显微镜的视场中大部分为背景,仅有少部分为有效的缺陷数据点。2)缺陷处的像素点具有离散性。如图 3(b)所示,每一处缺陷区域采集到的荧光图像并非连续的亮斑,而是由密集的离散亮点组合而成的亮区。3)微弱的荧光信号。对于图 3(a)中的麻

点缺陷,缺陷像素的亮度较高,然而在高倍物镜下,大部分缺陷图像则类似图 3(b)中的凹坑缺陷,信号微弱,亮度较低。

为了保证缺陷数据的完整性,针对缺陷信号微弱的特点,需要在抑制背景噪声的同时进行缺陷信号的增强。对实验数据进行分析后发现,图像中噪点的主要成分为椒盐噪声,因此去噪处理时采用中值滤波器进行滤波。同时,为了便于后续的数据处理,除了增强弱缺陷的信号外,还要进行背景均匀化。缺陷增强与背景均匀化的算法为

$$f'(m, n) = \begin{cases} 0, & f(m, n) < a \\ \frac{[f(m, n) - a] \times (255 - b)}{(255 - a)} + b, & a \leq f(m, n) \leq 255 \end{cases}, \quad (1)$$

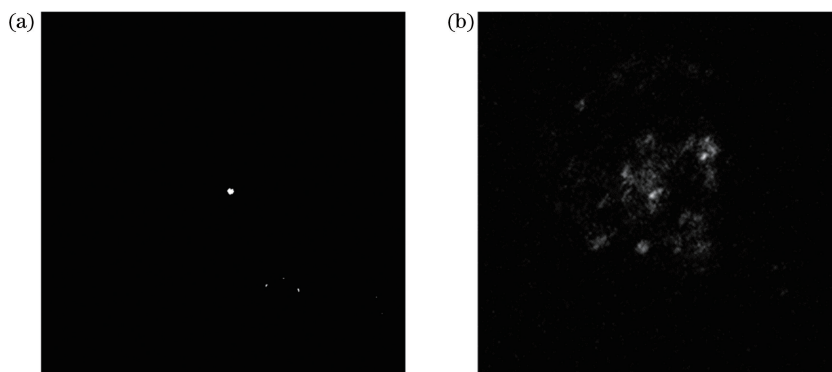


图 3 典型共聚焦显微镜采集到的亚表面缺陷。(a)麻点缺陷;(b)凹坑缺陷

Fig. 3 Typical subsurface defects collected by confocal microscope. (a) Pitting defect; (b) pit defect

式中: $f'(m, n)$ 为拉伸后的点 (m, n) 处的像素值; $f(m, n)$ 为拉伸前原始图像的像素值; a 为背景均匀化时使用的阈值上限,即认为低于此阈值的像素均为背景; b 为缺陷像素拉伸后的灰度下限; a, b 均可通过缺陷图像的灰度分布直方图得到。对缺陷灰度拉伸后,原始微弱的荧光信号相对得到了增强。应用本文提出的去噪增强算法对图 3(b)所示的凹坑图像进行处理,效果如图 4(a)所示,从处理后的图像中可以看出,缺陷的整体亮度得到了相对较大的增强。

在元件抛光后,沉积在缺陷内的抛光剂中的荧光物质分布不均匀,导致图像中缺陷像素具有离散程度较高的特性。为了消除荧光物质分布不均匀的影响,还原出实际的缺陷形貌,需要对缺陷像素进行聚合,即将同一缺陷在非连续亮区内的离散点聚合成连通的亮斑。根据缺陷的荧光信号虽然离散但离散程度不高的特点,本文设计了占比双阈值聚合算法,通过设置缺陷的灰度阈值与邻域分布的比例阈值对某一缺陷处的数据点进行聚合,还原出实际的缺陷亮斑。原理如图 5 所示,首先构造 $M \times N$ 的模

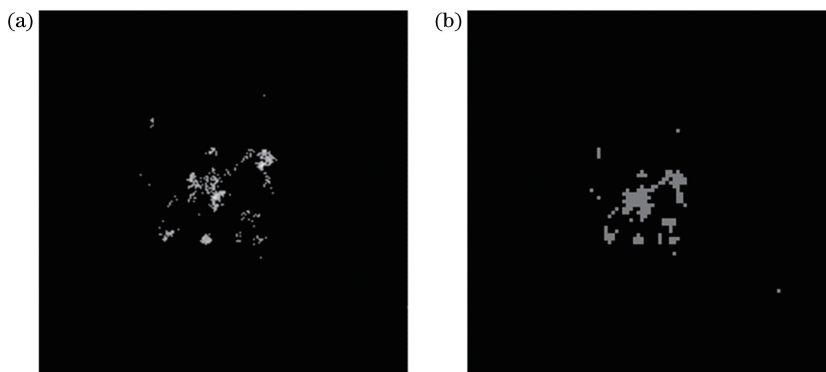


图 4 采用缺陷增强算法对图 3(b)进行处理后的效果。(a)增强处理后的图像;(b)聚合处理后的图像

Fig. 4 Processing effects of Fig. 3(b) by using defect enhancement algorithm. (a) Enhanced image; (b) aggregated image

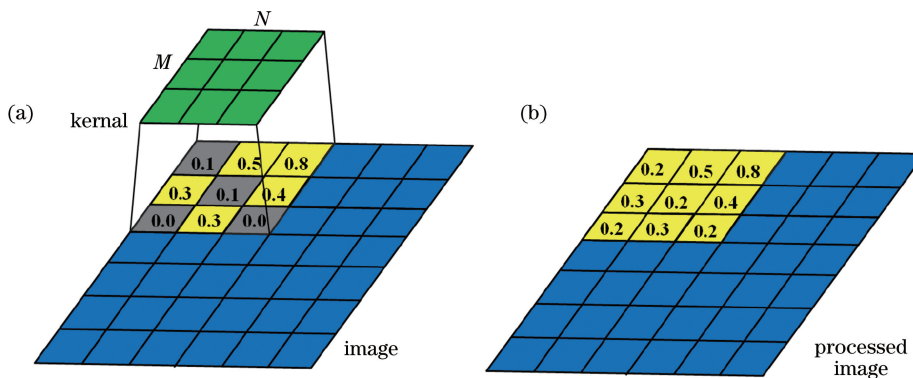


图 5 双阈值聚合算法的原理。(a)原始图像;(b)处理后的图像

Fig. 5 Principle of double-threshold aggregation algorithm. (a) Original image; (b) processed image

板,采用横向、纵向步长分别为 M 和 N 的方式遍历原始图像数据。针对某一模板内的子图数据,如果单个像素灰度值大于缺陷灰度阈值,则认为此像素为亚表面缺陷。统计子模板图像中缺陷像素的占比,如果高于人为设定的分布比例阈值,则认为模板内部的像素均为有效缺陷像素,将模板内低于缺陷阈值的像素的灰度设为阈值;如果模板内缺陷信号的占比低于比例阈值,则不进行处理。图 4(b)所示为使用聚合算法对图 3(b)中离散的亚表面缺陷像素进行处理后的效果,可以看出,离散的缺陷亮点得到了有效聚合。

2.2.2 熔融石英光学切片的三维重建

在经过前述的图像预处理后,二维缺陷图像得到了有效的增强与还原,而后需要对层析图像进行三维重建。共聚焦显微镜所采集的图像为石英样品的一系列有序的横向切片。常用的针对序列化切片图像进行三维重建的算法有 Cuberille^[14]、Contour Filter^[15]、Marching Cubes (MC)^[16] 等。Cuberille 算法在实际的立体空间中对图像进行处理,复杂度较高,并且对于分布稀疏、表面突变较多的目标物体的重建精度较低,不适用于亚表面缺陷的重建。Contour Filter 算法在单层图像的基础上进行二维轮廓的提取,而后利用各层提取的二维轮廓进行三维拼接;但提取每层图像的二维轮廓时耗时相对较长,而且在进行各层轮廓的拼接时采用直连的形式,采用共聚焦显微镜采集亚表面缺陷图像时会留出一定的层析间隔,对于形貌随机的亚表面缺陷,直连形式无法弥补层析间隔带来的缺陷信息的缺失。MC 算法将体数据场细分至最小单元后,逐单元通过插值逼近构建等值面,相对于 Contour Filter 算法,MC 算法具有更高的重建精度,极为适合形貌随机与杂乱的亚表面缺陷的重建,不过整个重建过程的运算量较大。

MC 算法通过读取全部层析图像建立三维体数据场。如图 6(a)所示,上下相邻的 8 个顶点组成

MC 算法的最小数据单元,称为体素。在抽取等值面的过程中,原始 MC 算法需要遍历体数据场中的全部体素,根据体素立方体的 8 个顶点像素值进行最小等值面的插值,再根据全部体素插值得到的等值面构建完整的重建表面。普通光学元件的亚表面缺陷分布十分稀疏,完全遍历体数据场时,大量无效体素的遍历会浪费较多的时间与空间资源,因此需要对时间与空间效率进行优化。优化方案可以考虑从二维图像出发,仅针对划选出的有效缺陷区域进行重建。然而对于通常采集的较大口径、多视场情况,由于缺陷位置未知,同时缺陷数量较多,无法通过人为观测直接划选缺陷区域,若通过缺陷提取算法进行二维缺陷区域的自动选择,则需遍历全局二维图像,同时,层析间隔的存在可能会使得二维缺陷区域映射至三维缺陷空间出现较大偏差。

本文提出了应用基于八叉树改进的 MC 算法来重建亚表面缺陷的方法,该算法的原理如图 6(b)所示,将原始三维体数据场设为树的根节点,而后将原始数据场进行八等分,每一等分点作为八叉树的子节点;如果子数据场存在待重建的等值面,则继续进行八等分,如果子数据场不存在等值面,则停止分割,将其作为树的叶节点。对上述算法进行递归操作,直到获得最小体素级为止。仅针对有效叶节点采用原始 MC 算法插值出等值面,最终构建出完整的亚表面缺陷的三维形貌。相比其他算法,在时间与空间资源方面,该算法避免了大量无效体素的读取与插值;在精度方面,该算法从三维空间中直接选择缺陷区域,对于层析间隔中缺失的缺陷信息,通过插值进行弥补。可见,改进的 MC 算法在精度与效率方面更适合熔融石英样品亚表面缺陷的重构。

本文提出的整体重建算法的流程如图 7 所示,算法总体可以分为体数据建立与三维重建两步。体数据建立包括前文所述的去噪、缺陷增强、缺陷点聚合以及点云建立四部分;重建部分就是在建立好的点云基础上进行有效单位的迭代分割,舍弃无效体

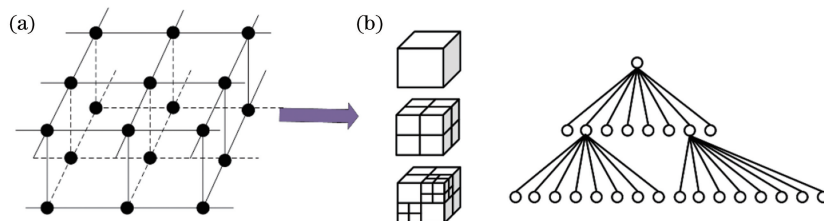


图 6 基于八叉树算法的改进 MC 算法的原理。(a)体数据的建立;(b)八叉树分割

Fig. 6 Principle of improved MC algorithm based on octree algorithm. (a) Establishment of volume data; (b) octree segmentation

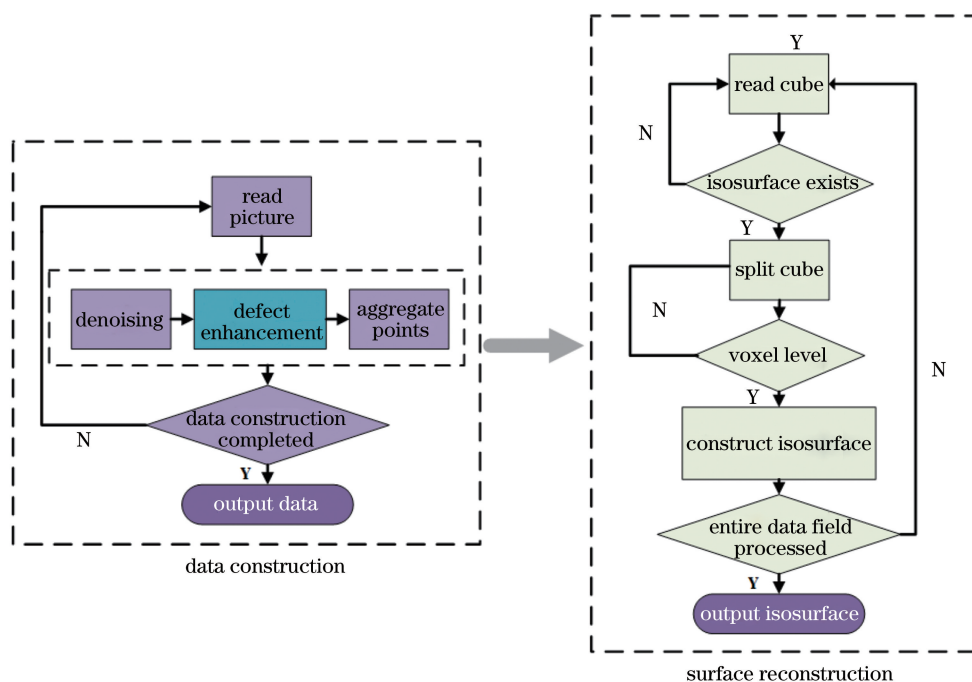


图 7 三维重建算法流程图

Fig. 7 Flow chart of three-dimensional reconstruction algorithm

元,随后对有效体素进行插值连接,最终完成等值面的建立。

3 亚表面缺陷的三维重建仿真

亚表面缺陷重建的精度是衡量算法优劣的重要标准。为了比较重建后还原的三维轮廓与原始缺陷轮廓的差异,本文进行了缺陷重建的仿真测试。仿真测试流程如下:人为仿真一处亚表面凹坑形缺陷,通过对仿真缺陷截取横截面来模拟共聚焦显微镜的层析采集效果,进而应用本文提出的三维重建算法进行重建还原,最后与原始缺陷进行比较,验证所提算法的重建精度。

仿真的凹坑形缺陷如图 8(a)所示。仿真检测的横、纵向范围均为 $15\ \mu\text{m}$,纵深 $20\ \mu\text{m}$ 。仿真凹坑缺陷的最大截面为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$,最大纵向深度为 $18\ \mu\text{m}$,仿真中加入了荧光图像中最常见的椒盐噪声作为重建的干扰项。

从样品表面开始模拟扫描,扫描步长为 $1\ \mu\text{m}$,组成 20 张层析仿真数据。图 9(a)所示为仿真亚表面缺陷的横截面图像。为了完全模拟实际的共聚焦显微镜采集的亚表面缺陷,在仿真缺陷内部加入了离散程度较高的随机灰度分布,灰度分布范围为实验实际采集的层析图像的平均灰度区间,以保证仿真缺陷具有前文所提出的共聚焦亚表面缺陷微弱、离散的特性,实际仿真层析效果如图 9(b)所示。此外,

单层图像横向分辨率与共聚焦显微镜层析所采用的横向分辨率保持一致,为 $1024\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$,缺陷背景引入仿真的杂散光作为背景噪声。

应用本文提出的重建算法对图 8(a)的仿真缺陷进行重建后的结果如图 8(b)所示。重建前的仿真缺陷在检测空间的体积占比为 19.34%,重建后的缺陷在检测空间的体积占比为 17.79%,二者相差小于 2%,说明预处理与重建算法有效地还原出缺陷的总体信息。为了验证重建算法对细节还原的准确性,将仿真凹坑缺陷与重建缺陷体数据对应后进行重叠点的剔除,获得的重建残差如图 8(c)所示,直观上可以看出残差点云的分布较为稀疏。重建残差在原始体数据场中的占比定量地反映了重建算法的精度,图 8(c)中残差的占比仅为 17.2%,原始体数据场得到了较为有效的重建。从残差点云的分布可以看出,残差在缺陷轮廓突变处的分布较为密集,说明重建的误差主要来源于此。共聚焦显微镜的纵向分辨率有限,相邻层间有一定的纵向间隔,当轮廓突变的尺度小于层析间隔时,采集的信息已不足以反映出原始缺陷的形貌;当轮廓突变尺度大于层析间隔时,如图 8(c)上半部分所示,本文提出的预处理与重建算法较为准确地还原出了原始缺陷的形貌。

图 10 对比了三种常用重建算法的精度。对图 8(a)的仿真缺陷设置多种层析间距(d),计算三种算法重建后的点云还原比例。从图 10 可以看出,

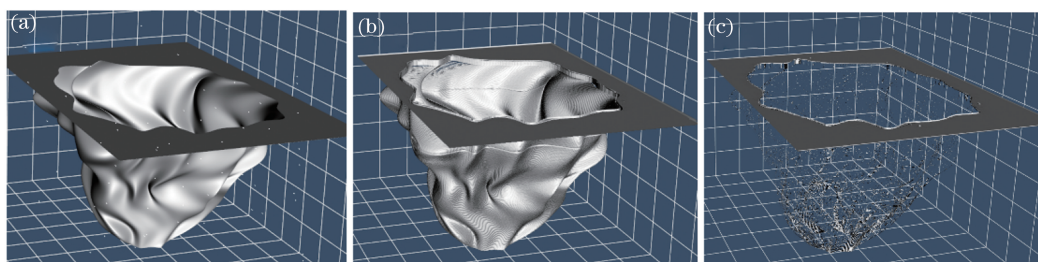


图 8 凹坑缺陷仿真重建。(a) 仿真缺陷;(b)重建的仿真缺陷;(c)重建残差

Fig. 8 Reconstruction of pit defect in simulation. (a) Simulated defect; (b) reconstructed defect in simulation; (c) residual of reconstruction

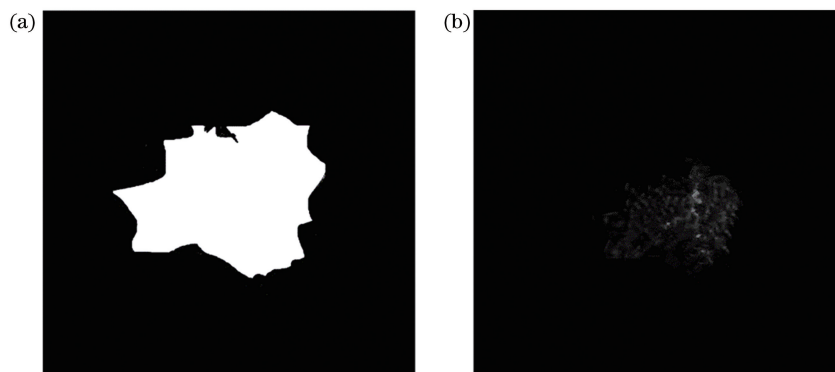


图 9 仿真得到的层析图像。(a) 仿真得到的缺陷的横截面;(b) 仿真得到的共聚焦层析图像

Fig. 9 Tomography image obtained from simulation. (a) Cross-section of defect from simulation; (b) confocal tomography image obtained from simulation

改进的 MC 算法在精度上与原始 MC 算法几乎相同,有效地保留了 MC 算法的高精度特性,且在各种层析间距下的精度均优于 Contour Filter 算法;重建的精度与层析间距成反比关系,对于常见的纵深尺度为数十微米的缺陷,采集的层析间隔设为 $1\ \mu\text{m}$ 左右较为适合,可在保证重建数据量不大的同时具有较高的重建精度。

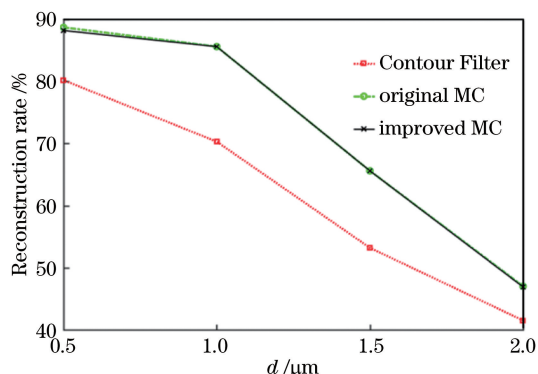


图 10 三种算法重建后点云的还原比例

Fig. 10 Restoration ratio of point cloud after reconstruction by three different algorithms

共聚焦显微镜的视场仅为数十至数百微米,而应用于光学元件检测时,检测范围往往在数毫米至数厘米范围,因此待检区域一般需要划分成多个子

孔径进行拼接。同时,显微镜在纵向上需要采集几十至上百层图像。因此,石英亚表面缺陷的重建数据量巨大,重建的时间与空间效率成为衡量重建算法是否适用的重要标准。为了验证本文提出的三维重建算法的高效性,选择 4 种体素数目(分别为 10^3 、 50^3 、 100^3 、 $1000^2 \times 100$),统计三种重建算法的平均耗时与平均空间占用情况。表 1 给出了三种算法在进行亚表面缺陷重建时的时间与空间效率。原始 MC 算法重建时需要遍历完整的体数据场,算法重建时间相对体素数近乎线性增长,同时,该算法重建时需要临时保存体素信息,因此所占用的空间最大。Contour Filter 算法在遍历体数据场的同时还需要进行轮廓提取与连接,因此该算法的耗时也较长。本文设计的改进 MC 算法由于省略了无效体素的遍历,因此数据量越大,算法性能的提升越明显。在本实验采集的缺陷图像单张分辨率为 $1024\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$,纵向采集 100 张的情况下,改进 MC 算法的运行速度相比原始 MC 算法提升了 62.2%,内存消耗降低了 37.6%;相比于 Contour Filter 算法,运行速度提升了 43.9%,内存消耗降低了 25.3%。由此可见,本文算法效率提升较大。本文提出的应用改进 MC 算法来重建共聚焦显微镜

采集的亚表面缺陷,可在保留原始 MC 算法高精度优势的同时,极大地提升了算法的运行速度与空间

利用效率,相比于其他算法,本文算法更适合用于亚表面缺陷的三维重建。

表 1 三种算法的运行时间与占用空间

Table 1 Running time and occupied memory spaces of three different algorithms

Number of voxels	Average time /ms			Memory space consumption /MB		
	Contour Filter	Original MC	Improved MC	Contour Filter	Original MC	Improved MC
10^3	0.5	0.4	0.4	0.01	0.01	0.01
50^3	70	51	45	2.1	3.1	1.3
100^3	312	356	286	101	140	32
$1000^2 \times 100$	19312	28632	10832	752	900	562

4 实验结果

实验所用检测样品为 JGS1 材质的熔融石英玻璃,采用碳化硅粒子(600 #)对其研磨 1 h,然后采用氧化铈粒子抛光 1.5 h。处理后的熔融石英玻璃直径为 50 mm,厚度为 3 mm,透过波前畸变 1λ ,表面划痕级数小于 60 #,麻点级数小于 40 #。使用的激光扫描共聚焦显微镜型号为 Zeiss LSM 800,针孔大小选择 $5\ \mu\text{m}$,激光器波长选择

405 nm,探测器接收波长范围设为 450~600 nm。共聚焦显微镜物镜的放大倍率选择 $20\times$ 、 $40\times$ 、 $63\times$ 三种档位,视场大小分别为 $0.32\ \text{mm} \times 0.32\ \text{mm}$ 、 $0.16\ \text{mm} \times 0.16\ \text{mm}$ 和 $0.11\ \text{mm} \times 0.11\ \text{mm}$,采集的图像分辨率为 $1024\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ 。图 11 所示为实验中检测到的几种典型缺陷,图 11(a)~(c)分别为 $20\times$ 物镜下检测到的划痕缺陷、 $40\times$ 物镜下检测到的微裂纹缺陷、 $63\times$ 物镜下检测到的凹坑形缺陷。

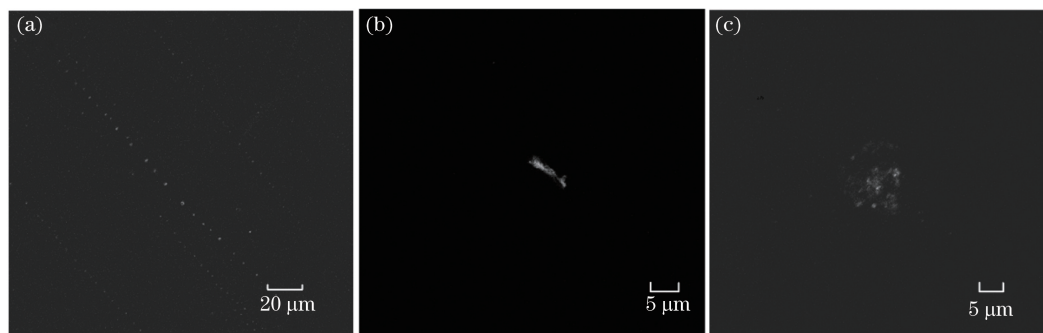


图 11 亚表面缺陷的检测结果。(a)划痕缺陷;(b)微裂纹缺陷;(c)凹坑缺陷

Fig. 11 Detection results of subsurface defects. (a) Scratch defect; (b) microcrack defect; (c) pit defect

为了能够获得完整样品中亚表面缺陷的信息,除了纵向扫描外,还须对较大缺陷进行二维横向扫描。实验时采用蛇形路径扫描多个子孔径,再进行拼接即可获得完整的亚表面缺陷信息,图 12 所示为长划痕缺陷在 $20\times$ 物镜下的子孔径扫描图像。扫描时,子孔径间需要留出一定的重叠区域,拼接时利用重叠区域的匹配来消除扫描时扰动带来的错位,图 12 中虚线外的区域即为子孔径间的重叠区域。从图 12 可以看出,划痕缺陷并非连续的荧光亮线,而是由一系列连续排列的麻点状缺陷组成。究其原因,光学元件划痕缺陷一般在石英制备时最后的抛光过程引入,抛光时磨粒磨制后会留下压迫损伤,而抛光粒子的直径大于共聚焦显微镜的横向分辨率,

划痕缺陷以原始磨粒压迫损伤的形式被记录下来,最终呈现出的图像为一系列连续的荧光亮点。

采用本文设计的预处理与重建算法进行重建,缺陷重建结果如图 13 所示。图 13(a)所示为图 12 中 3×3 子孔径拼接后,总视场中划痕缺陷的重建结果,最长划痕的长度为 $848\ \mu\text{m}$,平均纵向深度为 $13.07\ \mu\text{m}$,缺陷的最大纵向深度为 $33.07\ \mu\text{m}$ 。图 13(b)为划痕缺陷细节图,可以看出划痕由一个个锥形凹坑组成。图 13(c)、(d)为图 11(b)中微裂纹缺陷的单一孔径重建效果,从图 13(d)的缺陷细节图可以看出微裂纹外观呈楔形,其最大长度为 $21.8\ \mu\text{m}$,最大宽度为 $3.6\ \mu\text{m}$,最大纵向深度为 $20.8\ \mu\text{m}$ 。图 13(e)、(f)所示为图 11(c)中凹坑缺陷

经相邻 5×5 子孔径拼接后的重建结果,此凹坑缺陷的最大二维截面尺寸为 $16.8 \mu\text{m} \times 20.4 \mu\text{m}$,最大纵

向深度为 $37.7 \mu\text{m}$,此外还可以看出总视场中还有几处较小的麻点缺陷。

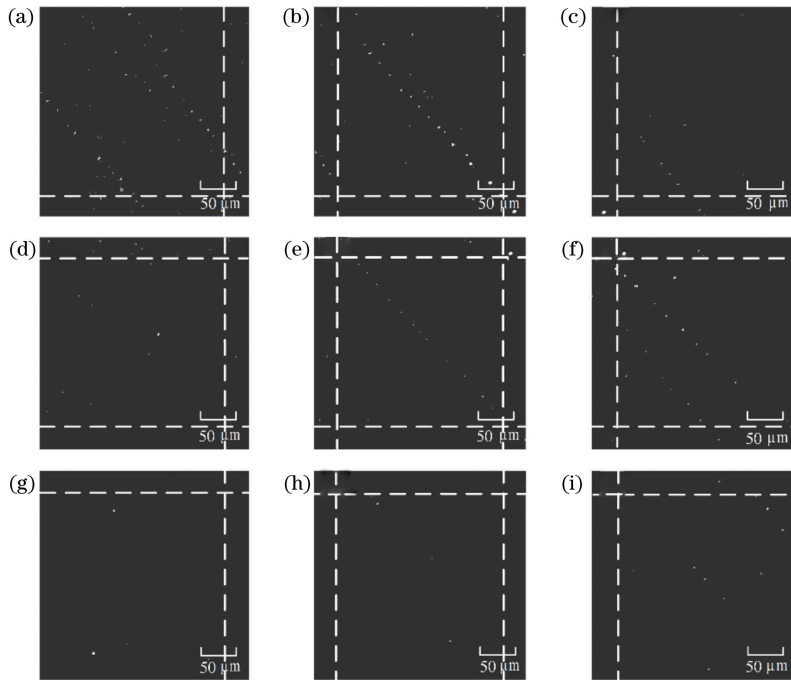


图 12 子孔径扫描图像

Fig. 12 Subaperture scanning images

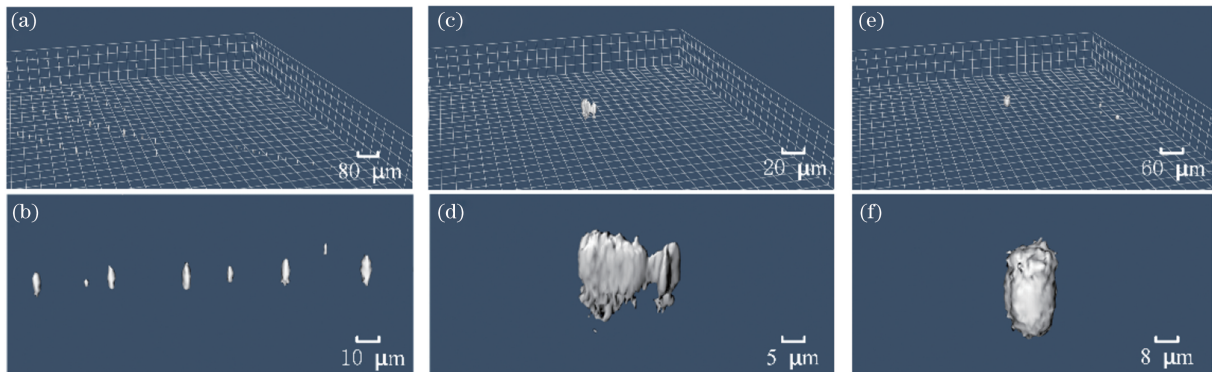


图 13 亚表面缺陷的重建结果。(a)(b)划痕缺陷的重建结果;(c)(d)微裂纹缺陷的重建结果;(e)(f)凹坑缺陷的重建结果

Fig. 13 Reconstruction results of subsurface defects. (a)(b) Reconstruction results of scratch defects; (c)(d) reconstruction results of microcrack defects; (e)(f) reconstruction results of pit defects

为了评价石英元件中缺陷的严重程度,除了对缺陷的二维横向大小以及纵向深度进行分析外,经过三维重建后,还可以从缺陷体积的角度来衡量。对图 13(a)中缺陷密集处的总视场进行分析,检测区域的横向尺寸为 $0.83 \text{ mm} \times 0.83 \text{ mm}$,纵向深度为 $50 \mu\text{m}$ 。对重建后的缺陷的体积进行计算,结果如表 2 所示。检测区域中最大缺陷的体积为 $636.7 \mu\text{m}^3$,最小缺陷的体积为 $0.8 \mu\text{m}^3$ 。本文实验所用熔融石英样品与文献[11]所用熔融石英样品的加工参数较为接近,文献[11]采用破坏性方法检测亚表面缺陷,检测结果如下:亚表面缺陷二维面积的

表 2 实验样品中缺陷的体积分布

Table 2 Defect volume distributions of experimental samples

Defect size / μm^3	Number of defects	Total volume / μm^3	Volume ratio (0–50 μm in depth) / %
0–100	13	556	0.002
>100–200	7	1123	0.003
>200–300	21	5433	0.012
>300–400	24	8512	0.025
>400	6	3362	0.010

最小值为 $0.153 \mu\text{m}^2$, 最大值为 $28.31 \mu\text{m}^2$, 缺陷的平均深度为 $18.178 \mu\text{m}$ 。本文测得结果与其较为接近。从表 2 可以看出, 待检区域中大部分缺陷的体积在 $200 \sim 400 \mu\text{m}^3$ 范围内, 大尺度缺陷的数目较少, 但大尺度缺陷的较大总体积同样会在较大程度上影响光学元件的质量。

文献[17-20]利用刻蚀液进行熔融石英元件亚表面缺陷的破坏性检测, 记录了不同刻蚀时间下样

品亚表面缺陷的暴露情况, 并连续记录了亚表面缺陷在不同深度下的截面情况, 暴露出的典型缺陷截面情况如图 14 所示。将使用本文方法检测到的三维重建结果与使用破坏性方法检测出的序列化缺陷图像进行间接对比, 可以看出, 本文重建结果与破坏性方法检测出的亚表面缺陷横截面形貌相符, 间接证明了本文算法对亚表面缺陷重建的有效性。

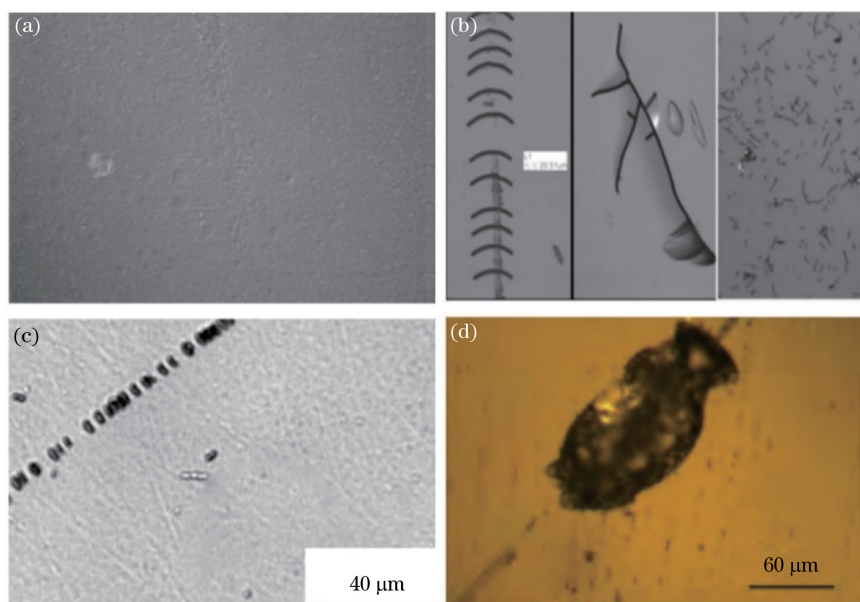


图 14 熔融石英亚表面缺陷破坏性检测结果。(a)凹坑缺陷刻蚀检测结果^[17]; (b)抛光残留亚表面缺陷^[18]; (c)划痕缺陷^[19]; (d)凹坑缺陷^[20]

Fig. 14 Destructive test results of subsurface defects of fused silica. (a) Etching test results of pit defects^[17]; (b) polishing-residual subsurface defects^[18]; (c) scratch defects^[19]; (d) pit defects^[20]

5 结 论

本文首先研究了利用激光扫描共聚焦显微镜检测石英亚表面缺陷的成像原理, 据此进行了共聚焦显微镜检测熔融石英亚表面缺陷的实验。基于实验结果分析得到缺陷图像具有信号稀疏、强度弱、像素离散三个特点, 并据此设计了包括缺陷增强与缺陷散点聚合的预处理算法, 以及基于八叉树算法改进的 MC 算法。通过对比几种三维重建算法的时间与空间效率以及算法的重建精度, 证明了本文设计的算法对石英亚表面缺陷重建的适用性。对实验采集的亚表面缺陷重建后, 通过统计分析定量得到了熔融石英缺陷的完整三维信息, 弥补了以往仅通过二维缺陷信息检测样品质量的不足, 形成了一套完整的检测石英亚表面缺陷的实验理论与方法。遗憾的是, 由于前人缺少对于熔融石英亚表面缺陷三维形貌的研究, 因此无法通过其他手段直接对比验证

本文提出的算法与实验结果。

参 考 文 献

- [1] Zhong M. Radiation effects on optical properties and laser damage performance of sapphire and fused silica [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 6-8.
钟勉. 辐照对蓝宝石、熔石英光学和激光损伤特性的影响[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 6-8.
- [2] Li F Q, Han W, Wang F, et al. Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
- [3] Qu X H, He Y, Han F, et al. Illumination system for detecting random defects on strongly reflective and complex surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 547-551.

- 曲兴华, 何滢, 韩峰, 等. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 547-551.
- [4] Wang S H, Luo G. Naturalness preserved image enhancement using a priori multi-layer lightness statistics [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(2): 938-948.
- [5] Yang Y Y, Lu C H, Liang J, 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.
- [6] Si S H, Hu F Y, Gu Y J, et al. Improved denoising algorithm based on non-regular area Gaussian filtering [J]. Computer Science, 2014, 41(11): 313-316.
姒绍辉, 胡伏原, 顾亚军, 等. 一种基于不规则区域的高斯滤波去噪算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(11): 313-316.
- [7] Xu C, Ping X L. Line detection algorithm based on improved random Hough transformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051001.
徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051001.
- [8] Duncan M D, Bashkansky M, Reintjes J. Subsurface defect detection in materials using optical coherence tomography[J]. Optics Express, 1998, 2(13): 540-545.
- [9] Chen J, You Z, Zhou Z Y, et al. A new laser non-destructive method of detecting micro/nano bulk defects in silicon materials[J]. Applied Laser, 1997, 17(2): 54-56, 68.
陈军, 尤政, 周兆英, 等. 硅材料微/纳米级体缺陷激光无损检测的新途径[J]. 应用激光, 1997, 17(2): 54-56, 68.
- [10] Williams W B. A novel fluorescence based method of assessing subsurface damage in optical materials[D]. Charlotte: The University of North Carolina, 2009: 45-47.
- [11] Wang J H, Zhang L, Wang H X, et al. Fused quartz subsurface damage detecting method based on confocal fluorescence microscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 0406004.
王景贺, 张磊, 王洪祥, 等. 基于荧光共聚焦技术熔石英亚表层损伤检测方法[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0406004.
- [12] Wang H, Tian A L, Wang C H. Simulation of subsurface damage scattering based on confocal imaging [J]. Optical Instruments, 2013, 35(3): 1-6.
王辉, 田爱玲, 王春慧. 基于共焦成像法的亚表层损伤散射仿真[J]. 光学仪器, 2013, 35(3): 1-6.
- [13] Neauport J, Cormont P, Legros P, et al. Imaging subsurface damage of grinded fused silica optics by confocal fluorescence microscopy [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3543-3554.
- [14] Herman G T, Liu H K. Three-dimensional display of human organs from computed tomograms [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1979, 9(1): 1-21.
- [15] Schroeder W J, Lorenson B, Martin K. The visualization toolkit: an object-oriented approach to 3D graphics [M]. 3rd ed. New York: Kitware, 2004: 178-180.
- [16] Lorenson W E, Cline H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 163-169.
- [17] Tian A L, Wang H T, Dang J J, et al. A novel method for subsurface damage measurement of optical components[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 214-218.
田爱玲, 王会婷, 党娟娟, 等. 抛光表面的亚表层损伤检测方法研究[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 214-218.
- [18] Du X R, Zhang X Q, Wang H, et al. Study of subsurface damage in polished silica glass [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(S1): 47-49, 77.
杜秀蓉, 张晓强, 王慧, 等. 抛光石英玻璃亚表面缺陷研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(S1): 47-49, 77.
- [19] Wang H X, Zhu B W, Wang J H, et al. Subsurface defects detection for the polishing surface of fused silica optics [J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(2): 8-12.
王洪祥, 朱本温, 王景贺, 等. 熔石英元件抛光加工亚表面缺陷的检测[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(2): 8-12.
- [20] Wang H X, Shen L, Li C F, et al. Analysis and experimental investigation of laser induced damage of optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302006.
王洪祥, 沈璐, 李成福, 等. 光学元件激光诱导损伤分析及实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302006.