

文章编号 1004-924X(2016)12-3020-07

激光聚焦线扫描法测量 KDP 晶体坯片的体缺陷

倪开灶¹, 刘世杰^{1*}, 吴周令², 陈 坚²

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 强激光材料重点实验室, 上海 201800;
2. 合肥知常光电科技有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要:为了快速准确测量磷酸二氢钾(KDP)晶体坯片的体缺陷,提出了高速激光聚焦线扫描散射成像方法,并建立了相应的测量系统。研究了该系统的测量原理和图像采集、图像处理和体缺陷信息提取方法。基于激光散射技术,结合高速运动装置对晶体坯片内部进行三维扫描,用线阵 CCD 探测器接收气泡、包裹物等体缺陷产生的散射光。然后利用折射率匹配液消除粗糙表面带来的不利影响。最后结合数字图像处理技术,对采集的图像进行实时处理。通过去除背景后与设定阈值比较得到具有体缺陷特征的图像,再对其进行二值化处理,提取得到体缺陷的位置和尺寸信息。利用该检测装置对 KDP 晶体坯片体缺陷进行了测量,结果显示其检测分辨率优于 40 μm ,能够为晶体坯片的精确切割和最大程度的利用提供依据,从而节省了大量成本。

关键词:磷酸二氢钾(KDP)晶体;晶体坯片;体缺陷;激光聚焦线扫描;散射测量

中图分类号:O77;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.3020

Measurement of bulk defects for KDP crystal billet with focused line scanning

NI Kai-zao¹, LIU Shi-jie^{1*}, WU Zhou-ling², CHEN Jian²

(1. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of
Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. ZC Optoelectronic Technologies. Co., Ltd., Hefei 230000, China)

* Corresponding author, E-mail: shijieliu@siom.ac.cn

Abstract: To detect the bulk defects in crystal billet of a KDP(potassium dihydrogen phosphate) crystal quickly and exactly, a laser focusing scanning scattering imaging method was proposed and a corresponding high speed line scanning measurement setup was constructed. The principle of detection, image acquisition, image processing and the extraction of bulk defects were investigated. Based on laser scattering technique, a focused line laser beam was used to scan all parts of the crystal billet with a high-speed movement device. The scattering light caused by bulk defects such as bubbles and inclusions was collected by a linear array CCD. The adverse effect caused by rough surface was eliminated with the index-matching fluid. Combined with digital image processing technique, the captured image was processed in real time. An averaged background was subtracted from the original image, then the image was compared with a threshold to judge the existence of bulk defects. The image with bulk de-

收稿日期:2016-10-18;修订日期:2016-11-20.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 11602280)

fects was binarized to exact the positions and sizes of bulk defects. Finally, the setup was used to test the crystal billet of a KDP, results show that the sensitivity by proposed method is superior to $40\ \mu\text{m}$. It verifies that this method provides supports for accurately cutting and making the most use of crystal billet and also saves a lot of costs.

Key words: Potassium Dihydrogen Phosphate(KDP) crystal; crystal billet; bulk defect; focused line laser beam; scattering measurement

1 引言

随着大型高功率激光系统输出的激光能量越来越大,对光学元件生产加工质量的要求也越来越高。其使用的精密光学元件需要有更高的抗损伤能力和更长的寿命^[1-2]。然而,光学元件内部存在气泡、铂金颗粒和其它包裹物等体缺陷,一方面,体缺陷会产生正透镜或负透镜的效果,对入射光造成严重的调制作用,使局部区域光强得到极大增强;另一方面,吸收型体缺陷将吸收入射光能量,引起局部温升^[3-4]。这些光学元件都在近临界阈值条件下工作^[5],局部光强的稍微增强即有可能引起光学元件的严重损伤,使得光学元件的抗损伤能力大幅下降。作为惯性约束聚变(ICF)激光驱动器中的优质光开关、二倍频和三倍频光学元件,KDP 和 DKDP 晶体的损伤问题直接制约着激光系统运行通量,尤其是工作在紫外波段的混频晶体的激光损伤^[6]。因此,有必要对光学材料、光学元件体内存在的缺陷进行检测。

目前,国内对光学元件内部的气泡、包裹物等缺陷的检测主要依赖目视检测^[7]。在暗室中,用强光照明光源从光学元件侧面照射,在与光源入射方向相垂直的通光面一侧观察气泡、包裹物发出的散射光,以此判断光学元件的气泡度。目视检测时,检测人员需要长期的训练,不能准确量化体缺陷的尺寸和位置,且检测员容易疲劳,不能连续工作,效率低。美国 LLNL 实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)的 J. Wolfe 和 M. Runkel 设计了一套 AIM(Automated Inclusion Mapper)系统用于探测大口径光学玻璃体内的气泡、包裹物^[8],用 CCD 相机接收体缺陷对入射片状激光产生的散射光。该方法能够较快的对元件进行检测,但是其采用光学元件运动以实现体内全部扫描,而样品口径大,快速运动不安全。且元件需要抛光,否则会收到粗糙表面散射光的

影响。S. G. Demos 等人利用荧光显微成像的方式研究 KH_2PO_4 晶体内部的缺陷^[9-10],用短波长激光激发缺陷发射荧光。该方法同样需要被检光学元件抛光,且速度较慢。以上检测方法均需要光学元件在经历切割、粗抛、甚至部分精抛后才能进行,若检测不合格,则整块元件都不能使用,前期的工作都将废弃,浪费了大量的人力、物力和时间。

综上所述,本文提出一种用于晶体坯片体缺陷检测的激光聚焦线光束扫描散射成像方法。利用聚焦线激光束对晶体坯片内部进行扫描,线阵探测器获得坯片内部缺陷图像,结合数字图像处理技术对获取的图像进行实时处理,得到体缺陷的尺寸和位置信息。该方法能够直接对晶体坯片进行快速无损检测,为晶体坯片选择最佳位置进行切割提供依据,使晶体坯片得到最大程度的利用。

2 测量原理

晶体坯片体缺陷检测原理如图 1 所示。聚焦线激光束入射到晶体坯片内部,位于侧面,与激光入射方向相垂直的探测系统通过光学系统对聚焦线激光束位置处缺陷产生的散射光进行收集成像。若无缺陷存在,则没有散射光进入成像系统,图像呈现暗背景;否则成高对比度的暗背景亮像。沿着图中所示扫描方向,聚焦线形激光束与探测系统进行同步扫描,通过图像处理,从而获得晶体坯片体缺陷的三维分布信息。由于所测材料为坯片,为避免粗糙表面对入射聚焦线激光束产生严重的散射,从而影响对晶体内部缺陷的探测,将晶体坯片放在折射率匹配液里。

根据 Mie 散射理论^[11],散射截面为:

$$\sigma = \left(\frac{2\pi}{k_{\text{med}}^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (1)$$

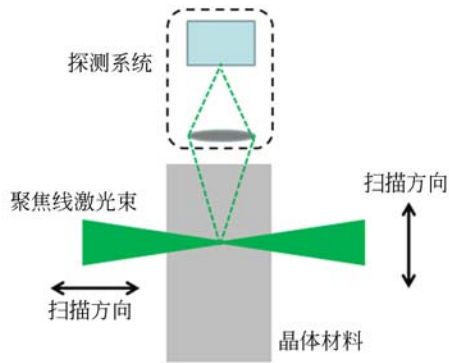


图 1 晶体坯片体缺陷检测原理图

Fig. 1 Schematic of measuring crystal billet bulk defects

其中:波数 $k_{\text{med}} = 2\pi n_{\text{med}}/\lambda$, n_{med} 为材料折射率, λ 为入射光在真空中的波长。系数 a_n 和 b_n 分别为:

$$a_n = \frac{\mu n^2 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{\mu m^2 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'}, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{\mu_1 j_n(mx) [x j_n(x)]' - \mu_1 j_n(x) [mx j_n(mx)]'}{\mu_1 j_n(mx) [x h_n^{(1)}(x)]' - \mu_1 h_n^{(1)}(x) [mx j_n(mx)]'}, \quad (3)$$

其中: j_n 为第一类球形 Bessel 函数, h_n 为球形 Hankel 函数, μ_1 和 μ 分别为体缺陷和晶体材料的磁导率, 取 $\mu_1 = \mu$ 。 $x = 2\pi n_{\text{med}} a/\lambda$, a 为体缺陷半径, $m = n_{\text{def}}/n_{\text{med}}$, n_{def} 为体缺陷折射率。

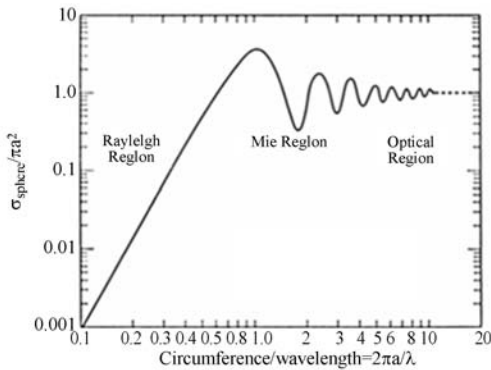


图 2 归一化散射截面分布曲线

Fig. 2 Normalized scattering cross section distribution curve

设置体缺陷为球形,由式(1)~(3)模拟得到如图 2 所示的曲线。当 $mx \gg 1$ 时,在光学散射区内, $\sigma/\pi a^2$ 趋近与常数。当 $mx \ll 1$ 时,在瑞利散射范围内,散射截面 σ 随着波长减小而增大,由文献[11]可知,散射截面 σ 与 λ^{-4} 呈正比。而在两者之

间的米氏散射截面呈现震荡特性。所以,当体缺陷尺寸一定时,入射光波长越短,散射截面和散射光强越大。对于一定尺度的体缺陷,短波长具有更高的检测灵敏度。但另一方面,入射光波长越大,其产生的体散射效应越小^[8]。

3 晶体坯片体缺陷测量装置

晶体坯片体缺陷检测装置如图 3 所示,主要由高速扫描系统、扫描同步系统、样品装夹系统和数据处理系统等组成。

为除去粗糙表面产生的散射给测量造成影响,KDP 晶体坯片浸在折射率匹配液中。折射率匹配液容器在 XYZ 方向均为晶体坯片留下足够空间,保证入射激光不被容器边缘阻挡。此外,在匹配液容器中,精确测量容器边缘至晶体坯片边缘的距离,为晶体坯片体缺陷定位提供坐标数据。

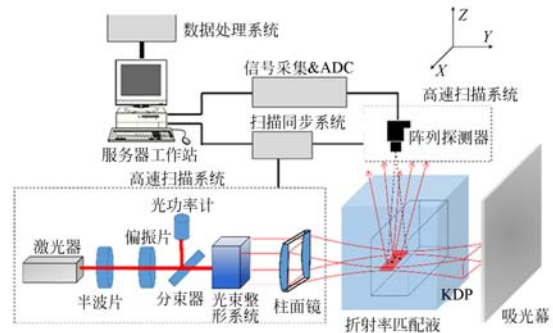


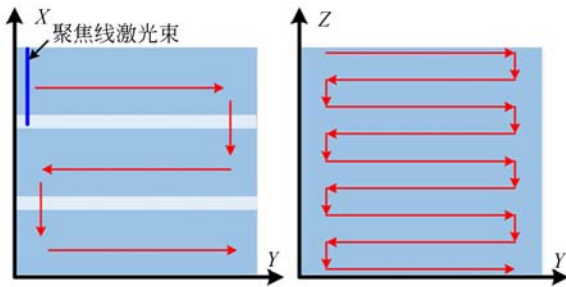
图 3 晶体坯片体缺陷检测装置

Fig. 3 Measuring setup of crystal billet bulk defects

高速扫描系统主要分为激光入射系统和探测系统。激光入射系统主要由激光器、半波片、偏振片、分束器、光功率计、光束整形系统、柱面镜等组成。探测系统主要包括阵列探测器等。激光器输出光束经过半波片和偏振片后,其偏振态和入射光强受到调节。然后,入射激光束经过分束器分成两束,一束通过光束整形系统,将高斯光束整形为平顶线光束。另一束直接被光功率计接收,用于实时监测入射激光光强的变化,实时修正入射激光强度,避免因入射激光功率发生变化引起体缺陷产生的散射光强发生变化,从而造成误判。平顶线光束经过柱面镜被聚焦成沿 X 方向的线光束,入射到晶体坯片内部。位于侧面与入射激光方向垂直的阵列探测器接收体缺陷产生的散射光,透射光被吸光幕遮挡掉。

为实现对整个晶体坯片内部进行检测,同时保证晶体坯片在折射率匹配液中位置固定,采用同时移动激光入射系统和探测系统。扫描同步系统用于保证扫描同步性,避免入射光聚焦位置与阵列探测器探测物面不重合,导致采集的图像失真。

扫描路径如图 4 所示,首先激光入射系统和探测系统沿 Y 方向同步移动,如图 4(a)所示;第一层扫描完成后,沿 Z 方向移动 1 个步长,继续对第二层进行扫描,如图 4(b)所示。为保证晶体坯片内部所有部分均能被检测到,不产生漏检,沿 Z 方向相邻两层之间有一定重叠。若入射聚焦线光束的线长比晶体坯片在 X 方向的尺寸小,在扫完一个线长后,激光入射系统和探测系统沿 X 方向同步移动,重复前面扫描过程。同样,为了避免漏检,相邻两个线长之间有一定重合,图中斜线部分为重叠区域。



(a) 同一层扫描路径 (b) 不同层之间扫描路径
(a) Scanning path in the same layer (b) Scanning path between different layers

图 4 聚焦线光束扫描路径

Fig. 4 Scanning path of focused line laser beam

数据处理系统主要是对信号采集器采集的图像进行处理。由于要对整个晶体坯片内部进行检测,其数据量远远大于一般表面疵病单个面的检测数据量。为提高检测效率,对采集的图像进行实时处理。图像处理过程如图 5 所示,随着入射聚焦线光束聚焦位置的深入,探测器采集到的图像的背景信号强度也不一样。首先计算单次扫描图像的灰度平均值 \bar{I} 作为平均背景:

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}{MN}, \quad (4)$$

其中: $M \times N$ 为单次扫描图像像素点, $I(i, j)$ 为像

素点灰度值。然后将背景减去,得到去除背景后的图像 I' :

$$I'(i, j) = I(i, j) - \bar{I}. \quad (5)$$

去除背景后的单层扫描图像与设定的阈值比较,若有像素点的灰度值超过阈值,保留该层图像进行下一步处理;否则,停止对该层图像的进一步处理。对保留的图像利用图像梯度和 Otsu 算法进行二值化处理^[12]。根据图像位置以及体缺陷在图像中的位置计算体缺陷在全局坐标系中的位置,根据体缺陷的像素面积计算其尺寸信息。

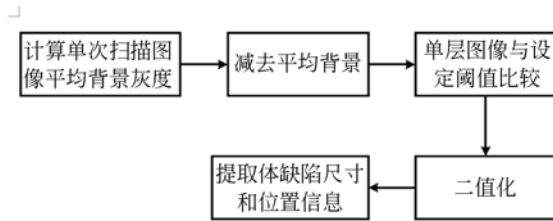


图 5 图像处理过程

Fig. 5 Flowchart of image processing

4 测量结果与分析

考虑入射光波长对体缺陷的散射截面和体散射的影响,实验所用激光器波长为 532 nm。激光器发出的光束经过整形系统和柱面镜聚焦后,聚焦线激光束线长为 100 mm,线宽约为 20 μm 。探测器为线阵 CCD,分辨率为 6 144 pixel \times 1 pixel,单个像元大小为 7 $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 。实验样品为 KDP 晶体坯片,尺寸为 100 mm \times 100 mm \times 10 mm,将 KDP 晶体坯片固定在折射率匹配液中,并通过软件控制电机平台沿 KDP 晶体 Z 轴方向进行连续层扫描,激光入射系统的横向速度设置为 7 mm/s,探测系统的横向速度设置为 3 mm/s,扫描间距为 2 mm。同步扫描系统使用的电机定位精度均为 20 μm 。如图 6 所示,位置 0 为 KDP 晶体坯片前表面层,位置 1 为坯片内部,距离前表面 2 mm,位置 2、3、4 分别距离样品前表面 4 mm、6 mm 和 8 mm,位置 5 为晶体坯片后表面层。

图 7 所示为未将 KDP 晶体坯片浸入折射率匹配液和浸入折射率匹配液后测量的对比结果。从图 7(a)中可以看出,未浸入折射率匹配液时,距表面 0.5 mm 处,CCD 未探测到有效信号,显示为暗背景。而浸入折射率匹配液后如图 7(b)

所示,在距表面 0.5 mm 处,CCD 探测到很多点状缺陷。但在距表面 1 mm 处,图像中已基本没有信号,显示为暗背景,如图 7(c)所示。这主要是由于未浸入折射率匹配液时,坯片表面很粗糙,入射激光被表面严重散射掉,只有很少一部分入射到坯片内部,并且 CCD 所在侧的坯片表面也为粗糙表面,若存在缺陷,其产生的散射光也较难通过坯片表面被探测器收集。由于坯片表面没有进行清洁,粗糙表面的凹坑里会存在杂质颗粒。浸入匹配液后,杂质颗粒折射率与匹配液以及晶体的折射率存在很大的不同,入射聚焦线激光束在杂质颗粒处会产生较强的散射信号。CCD 所在侧表面由于有匹配液存在,散射信号能够通过侧面被 CCD 接收成像。但在表面以下 1 mm 处,图 7(b)中产生的众多散射信号基本消失,如图 7(c)所示。这表明表面产生的散射信号对后面的体内缺陷检测不会造成影响。

晶体坯片内部扫描结果如图 8 所示,图 8(a)~8(d)分别为晶体坯片内部(对应图 6 位置 1~4)采集到的体缺陷信息图像,结果已经过图像处理算法的处理,图中白色区域为体缺陷区域。根据体缺陷占据的图像像素个数,以及 CCD 单个像素对应的物方尺寸,计算得到不同层上的体缺陷

的最大长度和最大宽度等尺寸信息,并进行标注。从图中可以看出,有一个尺寸较大的体缺陷①在 4 幅图像对应位置上都出现,在图 8(d)中断开成 2 个。其最大横向尺寸出现在图(a)上,其最大长度达到 21.31 mm,最大宽度为 6.05 mm。体缺陷②则出现在图 8(a)~(c)中,表明其沿 Z 方向尺寸约为 6 mm。体缺陷③则只出现在图 8(c)中,说明其沿 Z 方向尺寸不大于 2 mm。同时从图 8(a)和(b)可以看出,系统测量到的最小体缺陷尺寸为 40 μm ,说明系统至少可以分辨尺寸为 40 μm 的体缺陷。

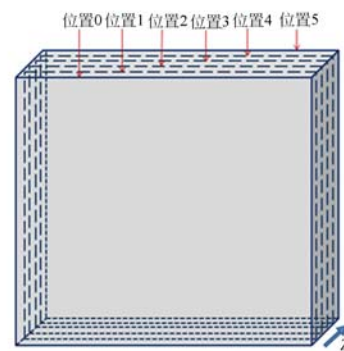


图 6 扫描层析示意图

Fig. 6 Diagram of scanning chromatography



(a) 未浸入折射率匹配液,距表面 0.5 mm

(a) Not immersed in index matching fluid, 0.5 mm below the surface

(b) 浸入折射率匹配液,距表面 0.5 mm

(b) Immersed in index matching fluid, 0.5 mm below the surface

(c) 浸入折射率匹配液,距表面 1 mm

(c) Immersed in index matching fluid, 1 mm below the surface

图 7 KDP 晶体坯片浸入和未浸入折射率匹配液测量结果

Fig. 7 Measuring results of KDP crystal billet immersed in and not immersed in index matching fluid

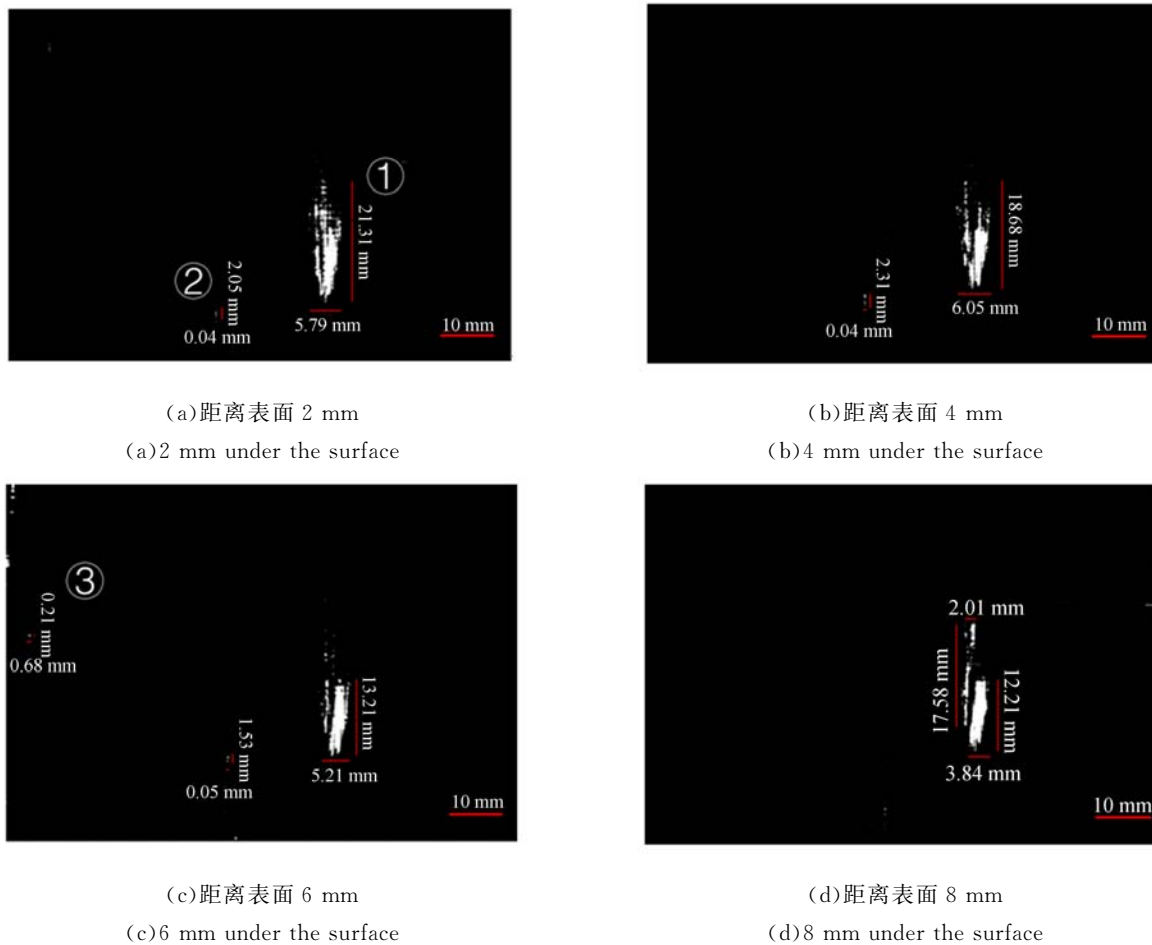


图 8 KDP 晶体坯片不同层扫描结果图

Fig. 8 Results of KDP crystal billet at different layers

5 结 论

针对 KDP 晶体坯片体缺陷量化检测问题, 本文提出了一种激光聚焦线扫描散射成像方法。通过聚焦线激光束与线阵探测系统进行同步快速扫描, 得到高对比度的体缺陷的三维分布图像。对单次扫描得到的图像进行实时去除平均背景,

对每一层图像进行阈值判断和二值化处理, 提取出晶体坯片体缺陷的分布信息。KDP 晶体坯片实验测量结果表明, 该系统能够有效检测出坯片内部的缺陷, 并提取出体缺陷的尺寸信息。能够为晶体坯片选择最佳位置进行切割, 使其得到最大程度利用提供支撑。实验中检测到的最小体缺陷尺寸为 $40 \mu\text{m}$, 通过优化改进, 系统的检测能力可以得到进一步提升。

参考文献:

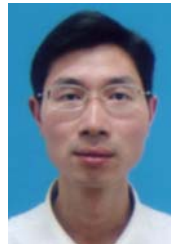
- [1] BAISDEN P A, ATHERTON L J, HAWLEY R A, *et al.*. Large optics for the national ignition facility [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69:295-351.
- [2] CAMPBELL J H, HAWLEY-FEDDER R A, STOLZ C J, *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5341: 84-101.
- [3] YU J X, XIANG X, HE S B, *et al.*. Laser-induced damage initiation and growth of optical materials [J]. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2014, 2014: 1-10.
- [4] PAN Y X, ZHANG H C, LI M M, *et al.*. Effect of focus position of ns pulse laser on damage char-

- acteristics of K9 glass [J]. *Proc. of SPIE*, 2015, 9543: 95430O-1-7.
- [5] LIAO Z M, RAYMOND B, GAYLORD J, *et al.*. Damage modeling and statistical analysis of optics damage performance in MJ-class laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28845-28856.
- [6] CHANG J X, ZHAO Y A, HU G H, *et al.*. Characterization of inclusions in KD₂PO₄ crystals [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 081601-1-4.
- [7] GB/T 7962.8—2010, 无色光学玻璃测试方法第 8 部分: 气泡度 [S].
GB/T 7962.8—2010, Test methods of colourless optical glass Part 8: Bubble [S]. (in Chinese)
- [8] WOLF J, RUNKEL M. System for detection of small inclusions in large optics [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7132: 71320W-1-8.
- [9] DEMOS S G, STAGGS M, RADOUSKY H B. Bulk defect formations in KH₂PO₄ crystals investigated using fluorescence microscopy [J]. *Physical Review B*, 2003, 67: 224102-1-6.
- [10] DEMOS S G, STAGGS M, YAN M, *et al.*. Microscopic fluorescence imaging of bulk defect clusters in KH₂PO₄ crystals [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(4): 268-270.
- [11] COX A J, DEWEERD A J, JENNIFER L. An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections [J]. *Am. J. Phys.*, 2002, 70(6): 620-625.
- [12] ZHANG B, KONG F Y, WU Z L, *et al.*. Investigation on optical surface defect extraction algorithm based on background correction and image segmentation method [J]. *Proc. of SPIE*, 2015, 9532: 95322D-1-7.

作者简介:



倪开灶(1989—),男,江苏盐城人,硕士,实习研究员,2015年于苏州大学获得硕士学位,主要从事光学元件缺陷检测技术方面的研究。E-mail: nikaizao@siom.ac.cn



刘世杰(1979—),男,陕西汉中,人,博士,副研究员,2008年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事精密光学检测技术、衍射光学和光学薄膜等方面的研究。E-mail: shijieliu@siom.ac.cn