

# 基于激光近场辐照的 351 nm 激光诱导 熔石英损伤研究

郭亚晶 唐顺兴 唐 清 朱宝强 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 针对 351 nm 激光诱导熔石英样品进行损伤实验。采用激光近场辐照样品,并基于近场辐照的损伤阈值定义方法进行损伤测试。利用带有灰度抑制的分水岭标记分割算法对损伤图像进行损伤区域提取,与相应近场分布进行比较,得到损伤区域边界点对应的局域能量密度即为损伤阈值。这种损伤测试方法简单、快速,有效降低了损伤阈值口径效应,且采用了能够有效去除噪声和抑制图像过分割问题的算法对损伤图像进行处理,使得到的损伤阈值和损伤增长系数有较高的准确性。实验结果表明,脉冲宽度为 3.13 ns 的 351 nm 激光诱导熔石英样品的损伤阈值为 2.94 J/cm<sup>2</sup>;在多次辐照样品情况下,熔石英样品出射面的损伤尺寸随着辐照次数的增加呈指数增长,其损伤增长系数为 0.32。

**关键词** 激光光学;351 nm 激光诱导损伤;激光近场;图像分割算法

**中图分类号** TN204 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0502004

## Study of Laser-Induced Damage in Fused Silica by 351 nm Laser Near-Filed Irradiation

Guo Yajing Tang Shunxing Tang Qing Zhu Baoqiang Lin Zunqi

(Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Damage experiments are conducted by irradiating 351 nm laser near-filed to fused silica based on the damage threshold definition of near-filed irradiating. Damage areas are extracted from damage images by the marker-based watershed algorithm with gray control. The initial damage threshold is defined as the fluence of critical site between damage region and no damage region, which is calculated by comparing the damage image with 351nm laser near-field. This damage testing method is sample, quick, which can effectively decrease the effect of beam diameter for damage threshold due to the bigger aperture. The algorithm of image segmentation effectively removes the noise and suppresses the over-segmentation, and improves the accuracy of initial damage and damage growth. The research shows that the damage of fused silica is induced by 351 nm laser near-field with pulse width of 3.13 ns. The initial damage threshold is 2.94 J/cm<sup>2</sup>. With multiple irradiation of fused silica, the damage growth of exit surface is exponential, and the coefficient of damage growth is 0.32.

**Key words** laser optics; damage induced by 351 nm laser; laser near field; image segmentation algorithm

**OCIS codes** 140.3330; 100.3008; 160.4670

## 1 引 言

熔石英作为高功率激光驱动系统终端光学组件

中的重要元件,其损伤主要是由 351 nm 激光诱导产生,其负载能力是限制激光驱动装置向大口径、高

收稿日期: 2012-12-10; 收到修改稿日期: 2013-01-30

作者简介: 郭亚晶(1984—),女,博士研究生,主要从事高功率激光系统中光束传输等方面的研究。

E-mail: guoyajing860501@163.com

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

功率方向发展的技术瓶颈之一。目前,神光 II 正常运行通量在  $1.0 \text{ J/cm}^2$  (351 nm, 3 ns) 以下,比国家点火装置(NIF)设计要求的激光运行传输通量  $8.0 \text{ J/cm}^2$  (351 nm, 5 ns) 低很多,但是神光 II 即使在设计通量下运行,熔石英元件仍会经常出现损伤<sup>[1~4]</sup>。相对于体破坏而言,由于元件表面清洁度、表面缺陷等原因,熔石英元件的表面破坏更容易发生<sup>[5]</sup>。光学元件的破坏不仅会降低元件透射率和光束质量,产生波前畸变,影响焦斑质量,损伤点的调制作用还会进一步损伤下游元件,成为一个恶性循环<sup>[6]</sup>。

激光诱导损伤是一个受激光参数、材料性质、实验条件等多种因素影响的过程。目前,国内外学者对 351 nm 激光诱导熔石英损伤研究十分关注,对损伤阈值研究主要是利用激光聚焦光束对熔石英样品进行损伤实验,对不同能量级下的损伤概率进行统计,拟合计算得到零损伤概率时的能量密度值即为损伤阈值,主要测试方法有:1-on-1, S-on-1, R-on-1<sup>[7~11]</sup>。这些测试方法要求样品测试点数量大,辐照次数多,数据量大,耗时长,不能同时描述绝对损伤阈值和损伤阈值分布情况,损伤阈值口径效应明显。由于激光诱导损伤是一个概率事件,元件损伤阈值受测量光束的辐照口径大小的影响,即损伤阈值的口径效应。劳伦斯利福摩尔国家实验室(LLNL)发现一个光学元件的小口径(不大于平方厘米量级)样品的损伤阈值是大口径元件的 2 倍<sup>[12]</sup>,同一块样品在不同口径的激光辐照下阈值可以相差 4~5 倍<sup>[13]</sup>。同时,利用远场进行损伤实验的另一关键难点在于焦斑尺寸的测量,它直接影响损伤阈值测试的准确性<sup>[14]</sup>。

本文熔石英损伤实验采用 351 nm 激光近场辐照熔石英样品进行损伤测试,通过图像分割技术提取损伤区域,并将其与相应的激光近场分布进行对比,获得样品的损伤阈值。另外,在激光多次辐照样品情况下,计算每一发次前后损伤区域面积的变化,利用损伤面积增长曲线来表征损伤增长情况,分析并评价熔石英元件的抗激光损伤能力,对提升大口径熔石英元件的负载能力有一定的指导意义。

## 2 基于近场的损伤阈值测试方法

针对激光远场测试损伤阈值的不足,设计利用 351 nm 激光的近场辐照熔石英来进行损伤测试。定义损伤阈值为损伤区域与非损伤区域临界处的局

域通量密度为损伤阈值。如图 1 所示,将损伤图像中损伤区域边界点映射到相应近场分布场中,D 为损伤区域,ND 为非损伤区域,临界点 1、2、3、4 对应的通量密度分别为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ ,理论上这些能量密度值即为熔石英样品的损伤阈值。

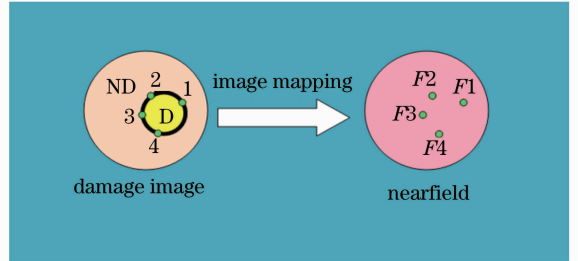


图 1 损伤图像与近场分布映射图

Fig. 1 Mapping between damage image and near-field

利用近场测量损伤阈值的方法需要从损伤图像中准确地提取损伤区域,由于噪声的影响,使传统图像分割算法产生过分割现象<sup>[15~17]</sup>。为此,本文采用带有灰度抑制的分水岭标记分割算法对损伤图像进行区域分割提取,基本流程为先滤波除噪,再灰度抑制来减少剩余噪声使图像过分割现象得到有效抑制,最后进行分水岭标记算法进行区域提取。

图 2 为利用带有灰度抑制的分水岭标记分割算法处理的图像效果,图中用绿色线圈出部分为真实的损伤区域,可以看出采用灰度抑制可以有效地抑制由于噪声存在导致的图像过分割现象。

## 3 实验装置

利用两块 II 型 KDP 晶体得到 351 nm 的激光,将熔石英样品放置在 351 nm 激光近场处,利用激光近场辐照样品产生损伤,实验装置如图 3 所示。由四程放大系统输出的 1053 nm 矩形基频光(竖直偏振)经偏振转换器后通过 KDP 晶体进行三倍频谐波转换得到 351 nm 的激光,其中 CCD 及角锥用于调节晶体准直位和晶体匹配位;两块  $45^\circ$  反射分离膜进行谐波分离得到波长为 351 nm 的激光。利用取样镜 8(反射率  $R=4\%$ )对光束取样进行近场、能量、时间波形的测量。图 4 为测量得到的 351 nm 激光的时间波形,其半峰全宽(FWHM)为 3.13 ns;透射的 351 nm 激光经过透镜后照射熔石英样品进行损伤,利用带有显微镜的 CCD 采集损伤图像。实验用熔石英样品为清洗过的康宁 7980 熔石英玻璃,本文所提到的损伤均为样品后表面的损伤。

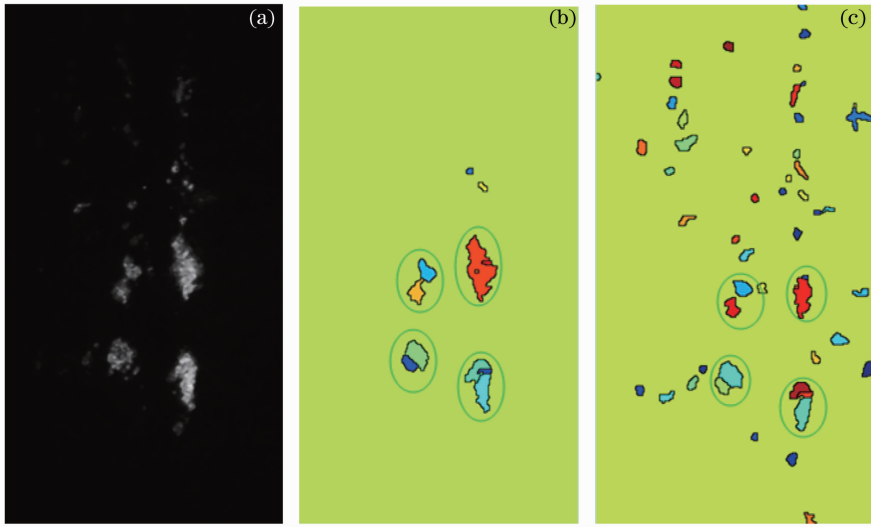
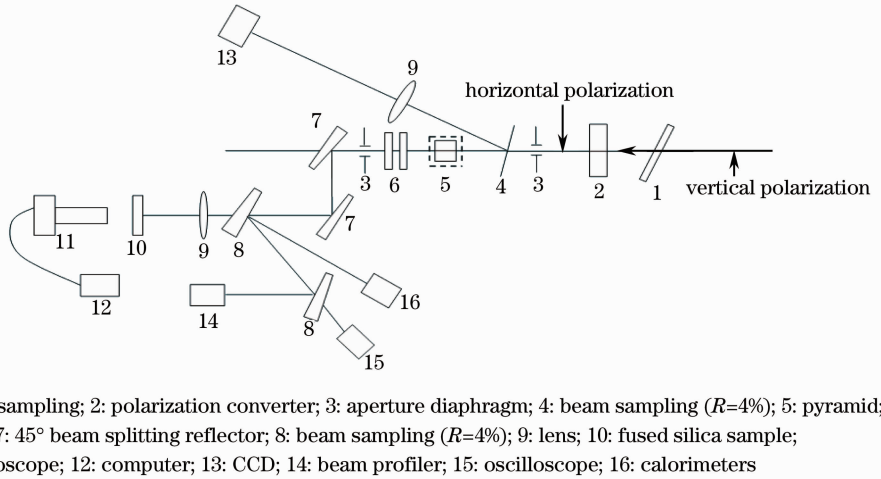


图 2 图像分割效果。(a)原始损伤图像；(b)带有灰度抑制；(c)未进行灰度抑制

Fig. 2 Effect of image segmentation, (a) Original damage image; (b) with gray control; (c) without gray control



1: beam sampling; 2: polarization converter; 3: aperture diaphragm; 4: beam sampling ( $R=4\%$ ); 5: pyramid; 6: KDP; 7:  $45^\circ$  beam splitting reflector; 8: beam sampling ( $R=4\%$ ); 9: lens; 10: fused silica sample; 11: microscope; 12: computer; 13: CCD; 14: beam profiler; 15: oscilloscope; 16: calorimeters

图 3 实验光路图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment

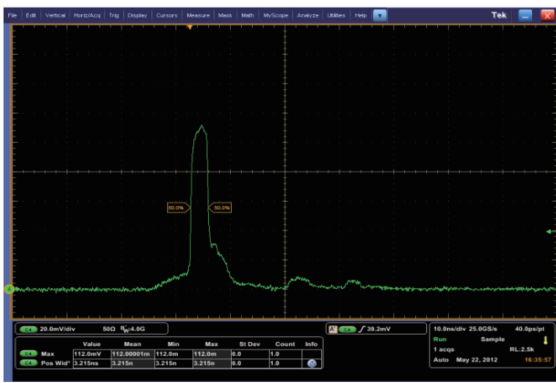


图 4 351 nm 激光脉冲的时间波形

Fig. 4 Temporal waveform of 351 nm laser

## 4 实验结果及分析

### 4.1 损伤阈值测试

如图 5 所示损伤实验中测得的 351 nm 激光的近场分布、损伤图像及损伤区域提取图像。将利用带有灰度抑制的分水岭标记算法分割得到的损伤区域提取图像与相应激光近场分布进行映射比较，计算出损伤区域边界点处的局域通量密度即为损伤阈值。表 1 为损伤区域各边界点处对应的通量密度，从表 1 中可知，该熔石英样品在 351 nm 激光辐照下的损伤阈值为  $2.94 \text{ J/cm}^2$ ，标准偏差为  $0.57 \text{ J/cm}^2$ ，A 类不确定度为 0.19。

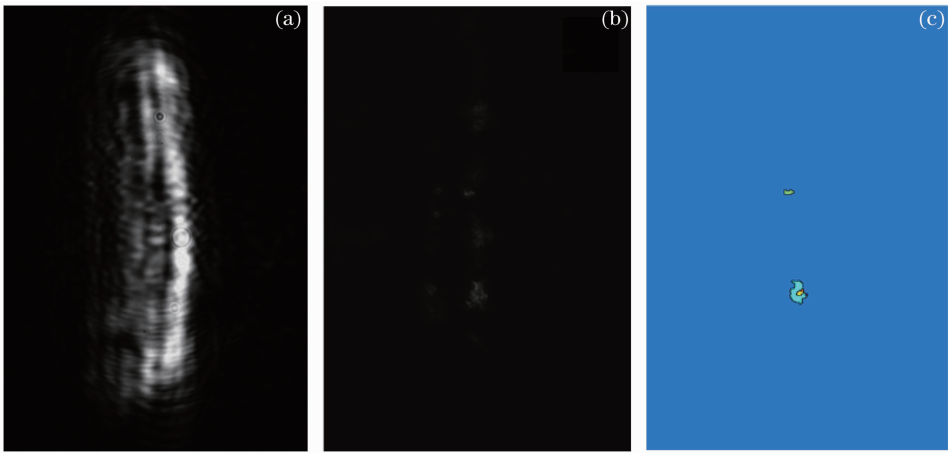


图 5 (a) 351 nm 激光近场; (b) 损伤图像; (c) 损伤区域提取图像

Fig. 5 (a) 351 nm laser near-field; (b) damage image; (c) damage area image extracted from damage image

表 1 初始损伤阈值计算结果

Table 1 Calculated results of initiation damage threshold

Critical points	1	2	3	4	5	6
Local fluence $/(J/cm^2)$	3.37	3.45	3.31	2.88	1.94	2.72
Initial damage threshold $/(J/cm^2)$				2.94		
Standard deviation $/(J/cm^2)$				0.57		
Type A uncertainty				0.19		

#### 4.2 损伤增长系数

将 351 nm 激光对熔石英样品进行多次辐照, 发现损伤尺寸随着发次的增加而增长, 如图 6 所示,

其中  $N=0$  时图像为未进行激光辐照时采集到的熔石英样品表面图像。

统计损伤区域面积的增长情况, 并将损伤面积

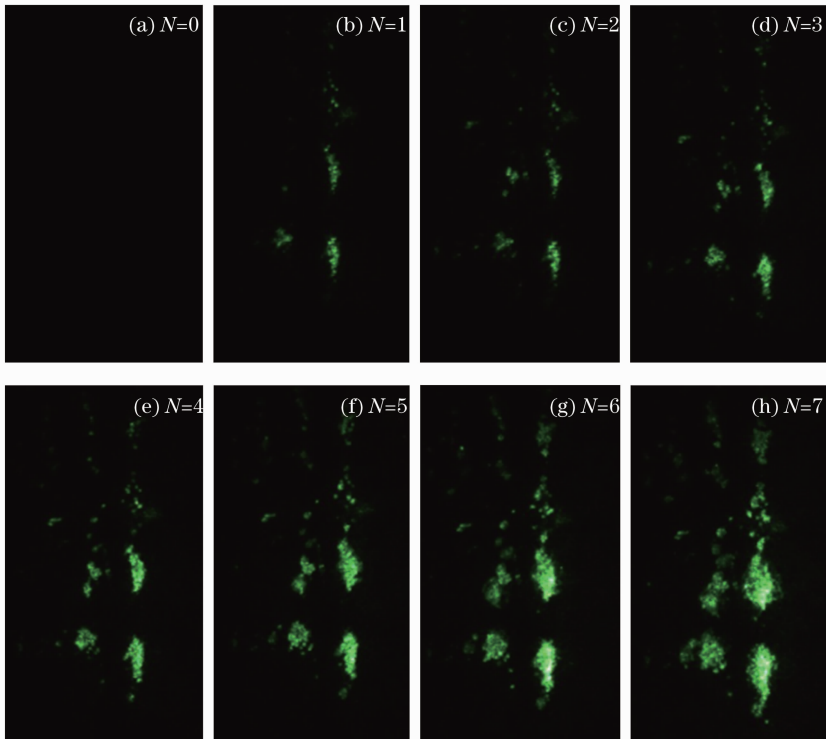


图 6 损伤随发次  $N$  的增长情况

Fig. 6 Damage growth with radiation number  $N$

$S_N$  与发次  $N$  按指数关系拟合,表达式为

$$S_N = S_0 \exp(\alpha \cdot N), \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为损伤增长系数。拟合得到损伤增长曲线如图 7 所示。其中  $\epsilon_{SS}$  和  $\epsilon_{RMS}$  分别是标准差和均方差,  $R^2$  为拟合曲线的多重确定系数,它表征了拟合曲线与数据点间的偏离程度。由图 7 可以看出,损伤面积呈现明显的指数增长趋势,损伤增长系数  $\alpha=0.32$ 。

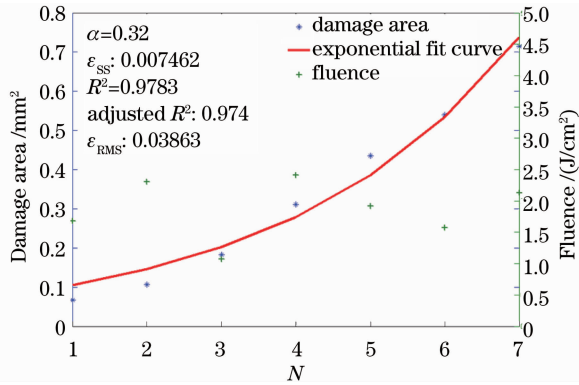


图 7 熔石英样品在 351 nm 激光辐照下的损伤增长情况  
Fig. 7 Damage growth of fused silica sample irradiated by 351 nm laser

## 5 结 论

针对脉宽为 3.13 ns 的 351 nm 激光诱导熔石英损伤情况进行实验研究,得到损伤阈值和损伤增长系数分别为  $2.94 \text{ J/cm}^2$  和 0.32。该实验是基于 351 nm 激光近场和带有灰度抑制的分水岭标记分割算法进行的损伤测试,该方法简单、快速,有效降低损伤阈值的口径效应,有利于大口径元件抗激光损伤性能评价。

## 参 考 文 献

- C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- B. M. Van Wonterghem, S. C. Burkhardt, C. A. Haynam *et al.*. National ignition facility commissioning and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 55~65
- Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702001  
赵东峰, 王利, 林尊琪等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702001
- Lin Zunqi. Progress of laser fusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207

- 林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- Meng Shaoxian, Wang Xiaoqin, Guan Fuyi *et al.*. Laser induced damage of glass surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10): 1428~1431  
孟绍贤, 王笑琴, 管富义等. 激光引起玻璃表面的破坏[J]. *光学学报*, 1995, **15**(10): 1428~1431
- H. Bercegol, P. R. Bouchut, L. Lemaignere *et al.*. The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5273**: 312~324
- Duan Lihua. Study on Laser Induced Damage of Optical Thin Film Coatings and Damage Testing Using Scattering Light Techniques[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. 7~33  
段利华. 光学薄膜激光损伤及散射检测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005. 19~23
- Electrotechnical Sector Committee, Laser and Laser-Related Equipment-Determination of Laser-Induced Damage Threshold of Optical Surfaces Part 1: 1-on-1 Test ISO 11254-1: 2000 [S]. 2000
- Sun Chengwei. Laser Irradiation Effect [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 326~334  
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 326~334
- Electrotechnical Sector Committee. Laser and Laser-Related Equipment-Determination of Laser-Induced Damage Threshold of Optical Surfaces Part 2: S-on-1 Test ISO 11254-2: 2000 [S]. 2000
- Li Dawei, Zhao Yuan'an, He Hongbo *et al.*. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 273~275  
李大伟, 赵元安, 贺红波等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 273~275
- H. Jean. Towards predicting the laser damage threshold of large-area optics [C]. *SPIE*, 1997, **2966**: 451~462
- Huang Wanqing. Investigation of Laser-Induced Damage on Large-Aperture Fused Silica Optical Components [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009. 7~33  
黄晚晴. 大口径熔石英元件表面激光损伤特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009. 7~33
- He Changtao. Image Processing Technologies in Laser Damage Threshold Testing [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. 26~35  
何长涛. 激光损伤阈值测试中的图像处理技术[D]. 成都: 四川大学, 2007: 26~35
- L. Vincent, P. Soille. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(6): 583~598
- Xu Yiyi, Liu Zhiqi, Liu Qi. Image segmentation based on watershed algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2011, **28**(9): 272~274  
徐奕奕, 刘智琦, 刘琦. 基于改进的分水岭算法图像分割方法的研究[J]. *计算机仿真*, 2011, **28**(9): 272~274
- Gao Li, Yang Shuyuan, Li Haiqiang. New unsupervised image segmentation via marker-based watershed [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(6): 1025~1032  
高丽, 杨树元, 李海强. 一种基于标记的分水岭图像分割新算法[J]. *中国图像图形学报*, 2007, **12**(6): 1025~1032

栏目编辑: 宋梅梅