

355 nm 纳秒紫外激光辐照下熔石英前后 表面损伤的对比研究*

刘红婕 周信达 黄进 王凤蕊 蒋晓东[†] 黄竞 吴卫东 郑万国

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年3月9日收到; 2010年9月6日收到修改稿)

为了理解前后表面损伤不对称性的物理内涵, 利用阴影成像技术研究了纳秒紫外激光诱使熔石英光学元件表面损伤的时间分辨动力学过程. 研究表明, 纳秒紫外激光与熔石英作用过程中前后表面损伤的物理机理是完全不同的. 前表面处空气中等离子体和冲击波较强, 等离子体的屏蔽作用抑制了余脉冲能量的沉积, 降低了元件损伤程度. 而后表面处等离子体吸收激光能量膨胀, 对后表面冲击作用更为严重, 形成的等离子体电子密度可达到 10^{23} cm^{-3} 以上, 反射部分激光能量与入射的激光余脉冲干涉, 使得损伤更为严重. 研究结果对理解损伤的机理有重要意义.

关键词: 熔石英, 激光诱使损伤, 阴影成像技术, 光学元件表面

PACS: 52. 38. Mf, 42. 70. - a, 52. 30. - q

1. 引言

光学元件损伤问题一直以来都是大型高功率激光装置中的关键问题, 如美国的国家点火装置^[1, 2]、法国的兆焦耳激光装置^[3]和中国的激光系列装置^[4, 5]. 光学元件损伤阈值决定了装置的最大输出通量, 因此提高光学元件的损伤阈值是提高高功率固体激光装置输出能力的关键, 是各国高功率激光器研究人员孜孜不倦追求的目标^[6, 7]. 而位于终端组件的熔石英紫外损伤是目前高功率激光装置中光学元件损伤问题中最为严重的部分, 是限制高功率激光器输出能力进一步提高的瓶颈^[8-12].

熔石英损伤呈现令人迷惑的不对称性, 前表面损伤少且程度轻, 后表面损伤多且严重. Crisp 等^[13]从 Fresnel 反射出发, 解释了初始损伤阈值的不对称性. 实际上, 这种不对称性不仅仅体现在初始损伤阈值上, 前后表面损伤形态的不同暗示了更为深层的因素^[14, 15]. Salleo 等^[16]利用阴影成像和激光偏转技术研究了 35 ps 激光脉冲在熔石英前后表面能量的沉积情况, 显示出前后表面等离子体的不一致

性. 对于纳秒激光脉冲, 由于后续激光与等离子体长时间作用, 熔石英前表面和后表面的结果显示有很大的不同^[17], 因此研究纳秒激光在光学元件表面的能量沉积过程对揭示纳秒激光损伤机理是非常有意义的.

本文从激光与材料相互作用的物理机理出发, 研究了纳秒紫外激光脉冲与熔石英作用过程中等离子体和冲击波在前表面和后表面损伤过程中所扮演的角色. 这对于理解损伤的根本原因, 掌握引发损伤的机理, 确定激光与材料相互作用过程中激光能量在材料内部的沉积作用是非常有意义的.

2. 实验系统

测试光路如图 1 所示, 抽运光为 6.8 ns, 355 nm 的脉冲激光, 输出光束为 $\Phi 3 \text{ mm}$ 的平顶 Gauss 光束, 最大输出能量为 50 mJ. 根据测试要求由短焦距透镜聚焦到样品前表面或是后表面, 样品测试位置焦斑大小约为 0.1 mm^2 , 光场分布为近 Gauss 分布. 由部分反射镜从抽运光取样, 经过缩束系统和滤波系统, 获得近场质量较好的探测光. 探

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2008AA8040508) 和国家自然科学基金 (批准号: 20903083) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jiangxdong@163.com

测光以与抽运光垂直的角度从侧面入射样品, 探测抽运光与样品作用区域, 将带有等离子体和冲击波信息的阴影图像通过成像系统成像到电荷耦合器件 (CCD). 探测光与抽运光之间的延时时间由两者之间的光程差控制. 为了便于探测光探测样品内部的变化情况, 样品的侧面也作了抛光处理.

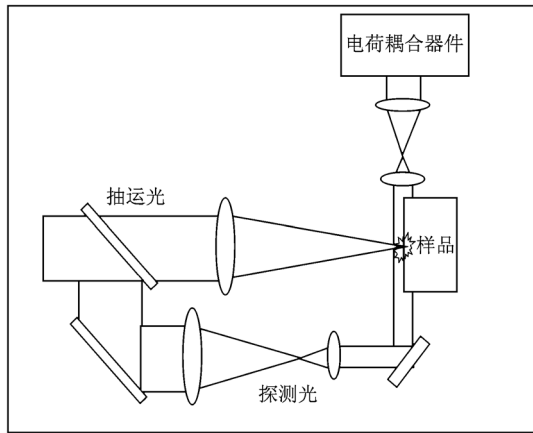


图1 测试光路示意图

3. 实验结果与讨论

为了减少表面缺陷的影响, 大多数实验所用的

激光通量都远高于研究表面的初始损伤阈值(后表面初始损伤阈值为 5.6 J/cm^2).

3.1. 初始损伤

纳秒紫外脉冲激光与熔石英光学元件前表面和后表面作用的初始损伤结果如图2—图4所示. 图2为抽运激光作用 27 ns 后熔石英表面空气和玻璃中的阴影图像, 其中图2(a)为前表面, 图2(b)为后表面, 抽运光通量为 26.8 J/cm^2 , 图中S为冲击波, I为等离子体, E为喷发的材料, D为损伤区, 下同. 从图2可以看出, 前表面空气中产生很强的等离子体和冲击波, 基本为半球形, 由于外界等离子体膨胀的压力, 导致玻璃内存在压力波形状为椭圆形. 而后表面空气中等离子体和冲击波强度较弱, 为半球形, 但由于玻璃空气界面处等离子体与激光作用, 致使玻璃内存在的压力波较强, 压力波前沿基本为平的. 后表面有材料汽化和喷发现象, 玻璃/空气界面上平行的细丝显示出明显的损伤, 前表面没有喷射和材料汽化现象. 抽运激光作用后由侧面探测熔石英表面的损伤痕迹如图3所示, 其中图3(a)为前表面, 图3(b)为后表面. 后表面侧面探测出明显的损伤深度, 而前表面侧面没有观测到损伤.

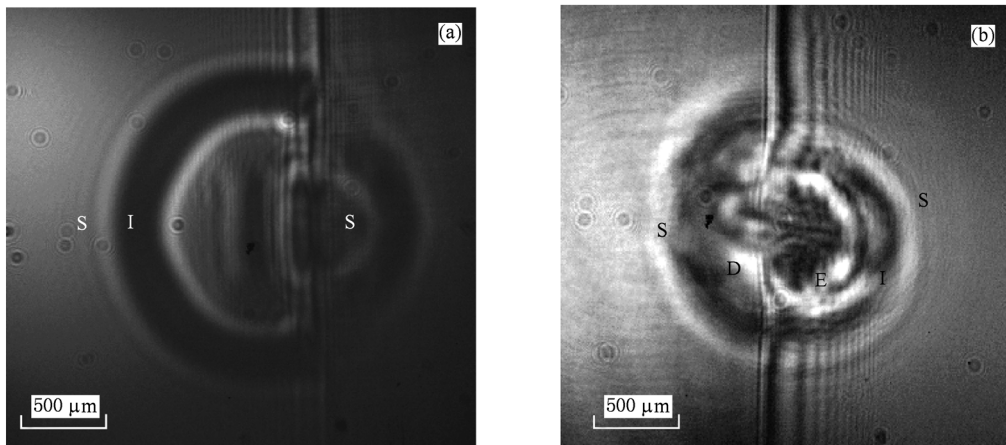


图2 抽运激光作用 27 ns 后熔石英表面空气和玻璃中的阴影图 (a) 前表面; (b) 后表面

图4为 26.8 J/cm^2 的抽运光分别与前表面和后表面作用形成的初始损伤形态的光学显微镜图像, 图4(a)为前表面, 图4(b)为后表面. 前表面损伤区由许多微小的小坑点和小裂纹组成, 损伤基本在玻璃表面, 因此侧面成像观测不到损伤, 如图3(a)所示. 后表面损伤区已形成明显的坑状结

构, 激光作用区大量材料被剥落, 图4(b)中发亮的颗粒为剥落的熔石英粉尘. 图3和图4显示, 相同激光通量下光学元件后表面初始损伤程度远高于前表面. 这可以由激光与材料相互作用的物理机理加以分析. 抽运激光作用于光学元件表面初次损伤的过程中, 首先是热作用. 热作用过程中, 激光与

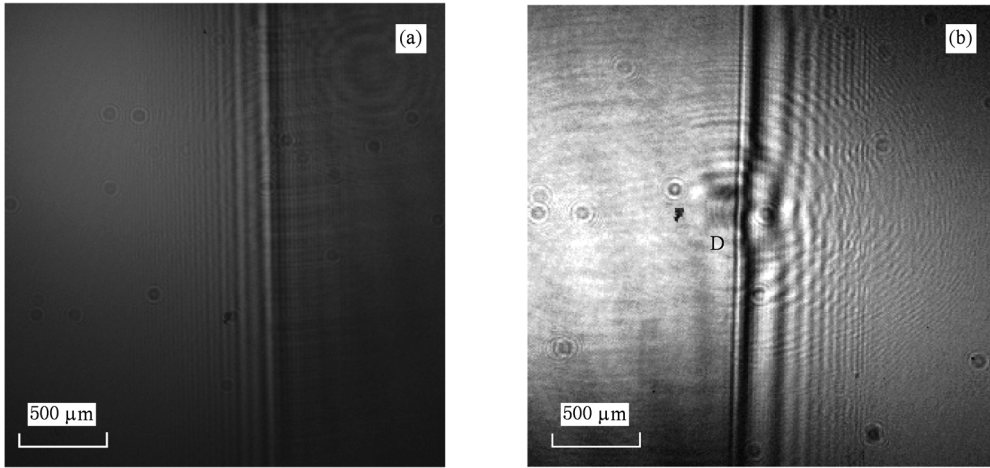


图3 抽运激光作用后侧面探测熔石英表面的损伤痕迹 (a)前表面;(b)后表面

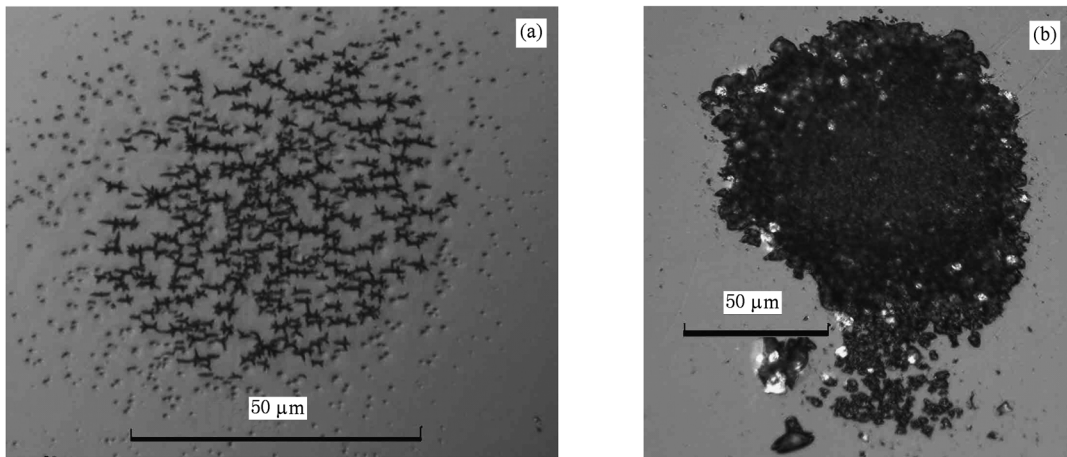


图4 前表面和后表面初始损伤形态的光学显微镜图像 (a)前表面;(b)后表面

材料作用导致局部高温,产生初始等离子体,时间约为几十纳秒.这个过程不会引起严重的损伤,之后激光余脉冲与前表面和后表面等离子体相互作用才是两者损伤不同的根本原因.对前表面,脉冲前沿产生的初始等离子体对后续激光能量强烈吸收,使得自身温度急剧升高,可达到 10^5 K 数量级,发出很强的白色闪光并快速向外膨胀产生冲击波^[18],如图2(a)所示.在这个过程中由于等离子体屏蔽了余脉冲激光能量,限制了激光能量在材料表面的进一步沉积,因此材料表面损伤程度较低,形成的损伤形态多是热致应力导致的小裂纹,如图4(a)所示.对后表面,脉冲前沿产生的等离子体同样吸收激光能量,但不同的是等离子体吸收激光能量膨胀时遇到的是玻璃界面,因此冲击力相对前表面更强.前后表面由冲击波产生的压力比为^[18]:

$$\frac{p_t}{p_b} = \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (1)$$

其中, γ 为比热比,当激光等离子体冲击波在空气中传播时 $\gamma = 1.4$; p_t 和 p_b 分别为前后表面处等离子体冲击波的压力.利用(1)式计算可知前后表面压力比约为 1:3.损伤过程中等离子体的电子密度远大于 10^{23} cm^{-3} ,当余脉冲激光通过该等离子体传播时会发生反射,在介质内部表面形成驻波,使该位置光压比增大^[19],导致光学元件前后表面的压力比差别更大.同时由于等离子体的反射作用,致使更多激光能量沉积在材料后表面界面内部,导致损伤更为严重.损伤位置材料的汽化和喷发情况如图2(b)所示,后表面较为严重的损伤坑形貌如图4(b)所示.

3.2. 多发次损伤

为了研究多发次辐照下前表面和后表面损伤增长的物理机理,我们测试得到了抽运激光与前表面和后表面损伤位置作用过程中的阴影图像,并与初始损伤发次进行了比较,结果如图5—图7所示.图5为抽运激光与光学元件前表面作用19 ns后探测光探测到的前表面空气和玻璃中的阴影图像,图5(a)为初次损伤,图5(b)为第四发次损伤.图6为抽运激光与光学元件后表面作用19 ns后探测光探测到的后表面空气和玻璃中的阴影图像,图6(a)

为初次损伤,图6(b)为第四发次损伤,抽运光通量为 16 J/cm^2 . 图中两个波像之间的垂直差异是一种折射效应,这是由于平行于探测光束的样品轻微倾斜造成的.由此可以看出,前表面多发次损伤产生的空气中等离子体和冲击波及玻璃内的压力波明显强于初次损伤,玻璃内没有明显的损伤.后表面多发次损伤面积和深度远远大于初始损伤,激光继续辐照损伤点会喷出大量喷射物,淹没等离子体和冲击波区域.由于喷射物折射率与熔石英一致,故初步判断发亮喷射物为高热熔石英粒子组成.

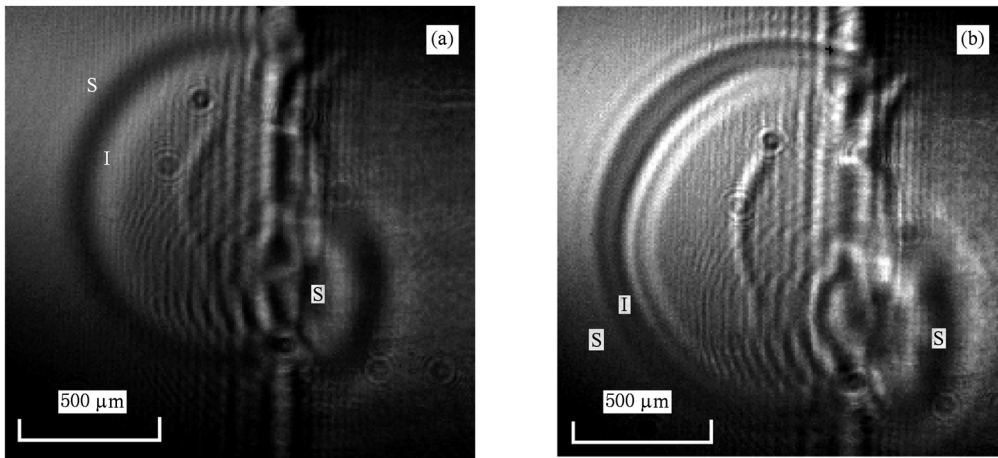


图5 抽运激光作用19 ns后熔石英前表面空气和玻璃中的阴影图 (a)初次损伤;(b)多发次损伤

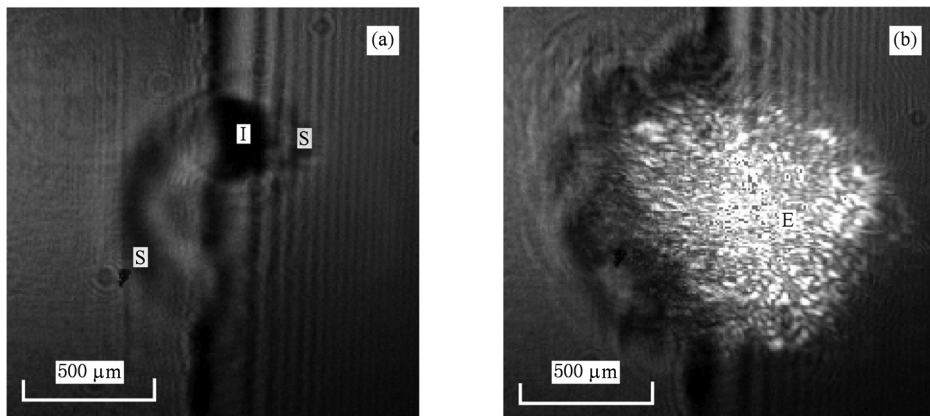


图6 抽运激光作用19 ns后熔石英后表面空气和玻璃中的阴影图 (a)初次损伤;(b)多发次损伤

图7所示为 16 J/cm^2 抽运光辐照16发次时前表面和后表面的损伤形态显微镜图像,图7(a)为前表面,图7(b)为后表面.从图7可以看出:前表面损伤坑浅而光滑,有高温烧蚀熔融的痕迹,周围有环形的高热等离子体烧蚀熔融区域和冲击波压

力区,整个表面损伤材料剥落程度较低.后表面损伤坑很深,多发次下会形成很深的通道,周围有大量裂缝,材料剥落严重,有大量的熔石英粉尘.

随着激光继续辐照,光学元件损伤区前表面与后表面损伤增长呈现不一致性,它的物理机理与初

次损伤是一致的,首先是短时间(几十个皮秒)的激光热作用,然后是激光余脉冲与等离子体和冲击波的相互作用.由于光学元件损伤区域更容易耦合激光能量,因此无论是前表面还是后表面,损伤程度都要比初始损伤严重.对前表面,热作用过程损伤位置上的等离子体和冲击波喷发更强,如图5(b)所示,之后由于等离子体的屏蔽作用限制了能量的沉积,最终形成带有环形烧蚀区和压力区的浅而光

滑的熔融坑,如图7(a)所示.后表面损伤坑具有一定的深度和大量裂缝,与前表面相比更容易吸收和耦合激光能量,形成更强的等离子体.余脉冲与通道内的等离子体相互作用,产生的冲击波受限于损伤通道内,对损伤坑的冲击压力更大.又由于损伤位置材料的机械强度大大降低,因此材料剥落更为严重,在抽运激光作用过程中喷射出大量的高热熔石英粉尘,如图6(b)所示.

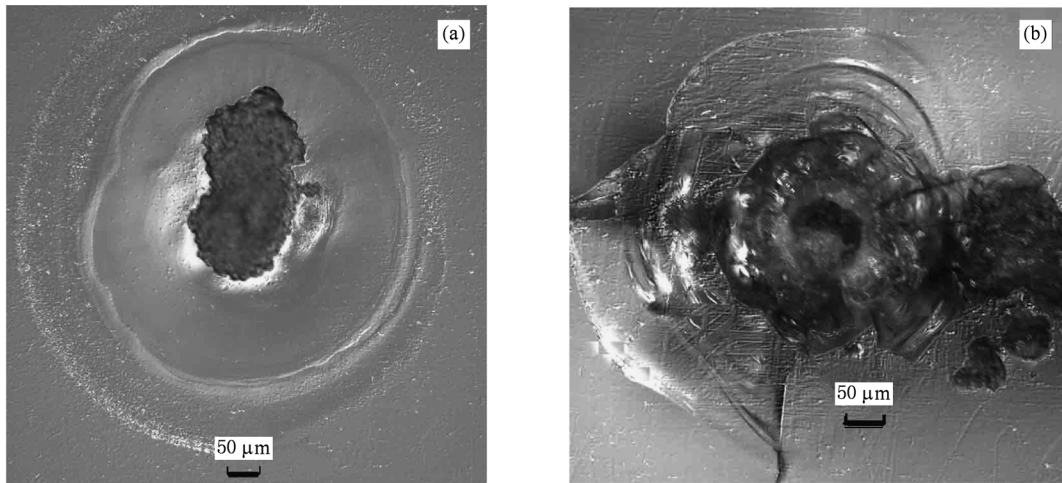


图7 前表面和后表面多次损伤形态的显微镜图像 (a)前表面;(b)后表面

4. 结 论

通过分析可知,激光导致光学元件表面损伤的程度与产生的等离子体有很大关系,前表面由于等离子体的屏蔽作用使得激光能量大大降低;而后表面由于等离子体对激光的反射作用使得沉积的能量增加,同时等离子体膨胀后产生更强的

压力波,最终导致光学元件后表面损伤程度远高于前表面.损伤物理机理的实验研究对揭示激光诱使光学元件表面损伤有着重要意义,并可以为下一步激光与其他材料作用特性研究奠定实验基础.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心王海军和李熙斌在实验调试过程中给予的帮助.

- [1] Moses E I, Campbell J H, Stolz C J, Wuest C R 2003 *Proc. SPIE* **5001** 1
- [2] Moses E I 2004 *Proc. SPIE* **5341** 13
- [3] André M L, Decroisette M 1998 *Europhys. News* **6** 235
- [4] Peng H S, Zhang X M, Wei X F, Zheng W G, Jing F, Sui Z, Zhao Q, Fan D Y, Ling Z Q, Zhou J Q 2001 *Proc. SPIE* **4424** 98
- [5] Xiao G Y, Fan D Y, Wang S J, Lin Z Q, Gu Y, Zhu J Q, Zhen Y X, Zhu J, Liu F Q, Chen S C, Chen Q H, Huang G L, Deng X M 1998 *Proc. SPIE* **3492** 890
- [6] Han J H, Feng G Y, Yang L M, Zhang Q H, Xie X D, Zhu Q H, Zhou S H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5558 (in Chinese) [韩敬华、冯国英、杨李茗、张秋慧、谢旭东、朱启华、周寿桓 2008 物理学报 **57** 5558]
- [7] Zhao X H, Gao Y, Xu M J, Duan W T, Yu H W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5027 (in Chinese) [赵兴海、高杨、徐美健、段文涛、於海武 2008 物理学报 **57** 5027]
- [8] Hunt J T 1999 *UCRL-ID-138120-98* [R] National Ignition Facility Performance Review, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore USA
- [9] Hunt J T 2000 *UCRL-ID-138120-99* [R] National Ignition Facility Performance Review, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore USA
- [10] Wang F R, Huang J, Liu H J, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D,

- Zheng W G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5122 (in Chinese) [王凤蕊、黄进、刘红婕、周信达、蒋晓东、吴卫东、郑万国 2010 物理学报 **59** 5122]
- [11] Zhao X H, Hu J P, Gao Y, Pan F, Ma P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3917 (in Chinese) [赵兴海、胡建平、高杨、潘峰、马平 2010 物理学报 **59** 3917]
- [12] Liu H J, Huang J, Wang F R, Zhou X D, Jiang X D, Wu W D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1308 (in Chinese) [刘红婕、黄进、王凤蕊、周信达、蒋晓东、吴卫东 2010 物理学报 **59** 1308]
- [13] Crisp M D, Boling N L, Dube G 1972 *Appl. Phys. Lett.* **21** 364
- [14] Hu H F, Wang X L, Li Z L, Zhang N, Zhai H T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7662 (in Chinese) [胡浩丰、王晓雷、李智磊、张楠、翟宏琛 2009 物理学报 **58** 7662]
- [15] Deng Y P, Jia T Q, Leng Y X, Lu H H, Li R X, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2216 (in Chinese) [邓蕴沛、贾天卿、冷雨欣、陆海鹤、李儒新、徐至展 2004 物理学报 **53** 2216]
- [16] Salleo A, Génin F Y, Feit M D, Rubenchik A M, Sands T, Mao S S, Russo R E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2840
- [17] Salleo A, Sands T, Génin F Y 2000 *Appl. Phys. A* **71** 601
- [18] Lu J, Ni X W, He A Z 1996 *Laser and Material Interaction Physics* (Beijing: China Machine Press) pp. 146, 194 (in Chinese) [陆建、倪晓武、贺安之 1996 激光与材料相互作用物理学 (北京:机械工业出版社) 第146,194页]
- [19] Sun C W 2002 *Laser Irradiation Effects* (Beijing: National Defence Industry Press) p163 (in Chinese) [孙承伟 2002 激光辐照效应 (北京:国防工业出版社) 第163页]

Comparison of damage between front and rear surfaces under nanosecond 355nm laser irradiation on fused silica*

Liu Hong-Jie Zhou Xin-Da Huang Jin Wang Feng-Rui Jiang Xiao-Dong[†]
Huang Jing Wu Wei-Dong Zheng Wan-Guo

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 9 March 2010; revised manuscript received 6 September 2010)

Abstract

To investigate the physical mechanism which causes asymmetric damages in front and rear surfaces, time-resolved dynamics of the fused silica's surface damage induced by the nanosecond ultraviolet laser is studied using shadow graphic technique. The results show that the damage mechanisms in front and rear surfaces under nanosecond laser interaction with fused silica are absolutely different. Although the plasma and the shock waves in air are relatively high, damage is reduced on the front surface because the plasma shielding limits energy deposition of the remnant pulse. While on the rear surface, two factors aggravate the damage, one comes from the impulsion of the plasma after its absorption of the laser energy, the other comes from the interference between the remnant pulse and the reflected pulse from the plasma. It is instructive to understand the damage mechanism.

Keywords: fused silica, laser induced damage, shadow graphic technique, optics surface

PACS: 52.38.Mf, 42.70.-a, 52.30.-q

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA8040508) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 20903083).

[†] Corresponding author. E-mail:jiangxdong@163.com